

## 摘 要

雕刻机的数控系统是数控雕刻机的控制核心，其控制功能的强弱、控制性能的优劣直接关系着数控雕刻机的加工质量与加工效率，对整个雕刻机的性价比和市场竞争力都至关重要。本文针对国产数控雕刻机现状和市场需求，研制开发基于高性能 DSP 新型雕刻机数控系统，以提高国产雕刻机数控系统的性价比和市场竞争力，并为雕刻机最终用户改善产品质量、提高生产效率、节约生产成本提供有效手段。

本文围绕市场调研提出的雕刻机数控系统功能和性能要求，拟定了控制系统的体系结构，完成了控制系统的软硬件设计开发。硬件上，采用 TI 公司最新推出的 TMS320F2812 型 32 位定点 DSP 作为控制核心，通过 CPLD 扩展存储器和外围 I/O，与基于单片机实现的人机界面配合，较好地兼顾了系统的控制性能与制造成本，也提高了系统设计灵活性和工作可靠性。软件上，采用汇编、C 语言混合编程，用汇编语言完成实时性控制任务，C 语言编程构造整个软件的主体框架、实现非实时性任务，既提高了系统软件的编程效率和可维护性，又保证了系统良好的实时性。此外，在运动控制算法上，应用比较积分法插补与良好的升降速控制算法结合，较好地满足了雕刻加工对快速性和加工平稳性的要求。样机系统的软硬件联调表明，本系统的功能和性能达到了预期设计要求。

**关键词：**数控系统，DSP，雕刻机，运动控制，加速度控制

## Abstract

The CNC system is the critical part of CNC engraving machines. The engraving quality and efficiency mainly depend on the functions and performance of the CNC systems. A good CNC system is important to the price and the market of engraving machine. From the current state of homeland engraving machines and aiming at the requirements of users, this thesis introduces a new type CNC system for engraving machines based on DSP. The type of CNC system can improve the performance of machine with lower price and the competing of market of engraving machines, which provides a way to reform the engraving quality, to improve the efficiency and to save the cost of process.

From the investigation of the market of engraving machines, the architecture of hardware and software of the CNC system is planned according to the required functions and performance of the CNC system. In the system, a 32-bits fixed point of DSP TMS320F2812 is used as CPU, a CPLD is used for peripheral I/Os and the extension of memory and a MCU is used to implement the man-machine interface, which results the system with good control performance, lower cost, good flexibility, and higher reliability. Using C language assisted with assembly language programs the system's software. Assembly language is used to complete real-time control tasks, and C language can be used to construct the frame of software and complete those unreal-time control tasks, which can not only improve the efficiency of programming and the maintenance of the program, but also provide the system with good real-time performance. In addition, the comparative integral interpolator assisted with good accelerating and decelerating algorithm is used for the speed requirement of engraving machines. As the result, the developed prototype of the CNC system can work with the anticipated functions and performance.

**Key words:** CNC, DSP, Engraving Machine, Motion control, Acceleration control

# 承诺书

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

本人授权南京航空航天大学可以有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅，可以将学位论文的全部或部分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论文。

(保密的学位论文在解密后适用本承诺书)

作者签名： 唐才峰

日 期： 05.03.27

## 第一章 绪 论

现代机械制造中，通用数控机床由于具有加工灵活性强、加工精度高、生产效率高优点而被广泛采用，特别适用于小批量、多品种、产品变化频繁且零件形状复杂的加工场合。典型的通用数控机床有数控车床、数控铣床和数控镗床等。

近年来，微电子技术、控制理论、检测技术、计算机控制等技术的迅速发展，数控系统不断更新，通用数控机床的功能不断完善，通用性、灵活性也进一步提高。同时，随着通用数控技术的普及应用，数控技术也正在不断向专用机床、其它非金属加工领域扩展。数控雕刻机便是其中一例，它作为一类特殊的数控机床，可实现传统由手工工艺完成的雕刻加工的自动化、高效率和高精度，不仅可应用于金属模具等复杂零件的精密加工，而且广泛应用于其它非金属加工，如广告业、木工等领域。

数字控制系统是数控机床的核心技术，是数控机床发展的关键技术。其性能的好坏、功能的强弱直接关系着数控机床的加工效率与加工质量，对整个制造系统的集成控制、高效运行起到至关重要的作用。因此，数字控制系统不仅是数控机床进一步发展的先导技术，而且将带动传统的制造模式向柔性化、自动化和数字化的方向发展，为整个制造业提供基础性战略技术。

### 1.1 数控系统的发展状况

自1952年美国麻省理工学院设计出世界上第一台三坐标数控铣床（采用电子管元件）以来，到现在已走过了50多年历程。数控系统由当初的电子管式起步，大致经历了以下几个发展阶段：硬件数控阶段；计算机数控系统发展和完善阶段；高速高精度计算机数控系统开发与应用阶段；基于个人计算机（PC）的开放式数控系统开发与应用阶段。

#### 1.1.1 硬件数控阶段(1952-1970年)

早期计算机运算速度低，完全不能适应数控机床实时控制的要求。人们不得不采用数字逻辑电路“搭”成一台机床专用计算机作为机床的数控系统，此数控系统被称为硬件连接数控，简称为数控（NC）。随着元器件的发展，硬件数控阶段历经了三代：即1952年采用电子管、继电器和模拟电路构成第一代数控系统；1956年利用小体积、小重量的晶体管取代电子管构成第二代数控系统；1965年随着小规模集成电路诞生产生了第三代数控系统，第三代数控系统较前面两代系统而言，其体积最小，功耗最

低、可靠性最高。

硬件数控阶段的控制功能完全通过硬件逻辑来实现，所以功能简单、灵活性差、系统可靠性低。从而制约了数控系统的进一步发展。

### 1.1.2 计算机数控系统发展和完善阶段(1970-1986 年)

1970 年，通用小型计算机业已出现并成批生产。其运算速度比五、六十年代有了大幅度的提高，这比硬件连接数控成本低、可靠性高。于是将它移植过来作为数控系统的核心部件，从此进入了计算机数控(CNC)阶段。同年在美国芝加哥数控展览会上，首次展出了以小型计算机为核心的计算机数控系统，标志着数控系统进入了以计算机为主体的第四代。至此，数控系统进入了“软联接”数控时代。

1971 年美国英特尔公司在世界上第一次将计算机的两个最核心的部件——运算器和控制器，采用大规模集成电路技术集成在一块芯片上。此芯片称之为微处理器。1974 年微处理器被应用于数控系统，象征着数控系统进入了第五代。由于微处理器是通用计算机的核心部件，故仍称为计算机数控。数控系统发展到了第五代以后，才从根本上解决了可靠性低，价格极为昂贵，应用很不方便等极为关键的问题，使数控系统达到了普及的程度。

随着超大规模集成电路、大容量存储器、CRT 等器件的发展和普及应用，在 70 年代末、80 年代初数控系统进入了第六代。在第六代数控系统中广泛采用多微处理器系统，提高了系统的集成度，进一步缩小体积。同时采用模块化结构，便于裁剪、扩展和功能的升级，从而可以满足不同类型数控机床的需要。数控系统产品也逐步实现了标准化，系列化。

### 1.1.3 高速高精度计算机数控系统开发于应用阶段(1986—至今)

为了实现高速、高精度曲面轮廓精加工，必须提高微轮廓线的解释处理能力和伺服驱动特性。随着 32 位微处理器的诞生，使得 CNC 系统具有了足够高的数据处理速度和能力，从而能够保证零件程序的传送、插补、加工线速度控制等处理操作。32 位 CPU 在 CNC 系统中得到了应用，使 CNC 系统进入了面向高速、高精度的第七代。1986 年，三菱电机公司率先推出了 CPU 为 68020 的 32 位 CNC，掀起了 32 位 CNC 的热潮，并逐渐成为当今数控系统的主流<sup>[4,5]</sup>。

### 1.1.4 基于个人计算机(PC)的开放式数控系统开发于应用阶段(1994—至今)

进入 90 年代以来，由于计算机技术的飞速发展，推动数控机床技术更快的更新换代。世界上许多数控系统生产厂家利用 PC 机丰富的软硬件资源开发开放式体系结

构的新一代数控系统。从此数控系统进入第八代基于个人计算机的开放式数控系统阶段。第八代数控系统的开放式体系结构使数控系统有更好的通用性、柔性、适应性、扩展性，并向智能化、网络化方向大大发展。由于数控系统继续向高集成度方向发展，使数控系统更加小型化、微型化，可靠性同时也大大的得到提高。

## 1.2 数控系统的发展趋势

随着人工智能在计算机领域的渗透和发展，数控系统引入了自适应控制、模糊系统和神经网络等控制机理。数控系统的控制性能不断的得到提供。新一代数控系统技术水平大大提高，促进了数控机床性能向高精度、高速度、高柔性化方向发展，使柔性自动化加工技术水平不断提高。

为了满足市场和科学技术发展的需要；为了达到现代制造技术对数控技术提出的更高的要求，当前，世界数控技术及其装备发展趋势主要体现在以下几个方面：

1、高速、高效、高精度、高可靠性：要提高加工效率，首先必须提高切削和进给速度，同时，还要缩短加工时间；要确保加工质量，必须提高机床部件运动轨迹的精度，而可靠性则是上述目标的基本保证。为此，目前世界上先进的数控系统都采用了 32 位微处理器，主频达到几十至几百兆，在最小设定单位为 1 $\mu$ m 下，最大快速进给速度达到 240m/min。同时世界先进数控系统通过减少数控系统的控制误差和采用补偿技术来提高数控系统的加工精度。

2、智能化：随着人工智能技术的不断发展，并为适应制造业生产高度柔性化、自动化的需求，数控系统的智能化程度在不断的得到提高。智能化不仅贯穿在生产加工的全过程（如智能编程、自适应控制、工艺参数自动生成），还要贯穿在产品的售后服务和维修中。即不仅在控制机床加工时数控系统是智能的，就是在系统出了故障，诊断、维修也都是智能的，对操作维修人员的要求降至最低。

3、柔性化：柔性是指数控设备适应加工对象变化的能力。数控机床向柔性自动化系统发展的趋势是：一方面从点（数控单机等）、线（柔性制造系统等）向面（工段车间独立制造岛等）、体（分布式网络集成制造系统等）的方向发展，另一方面向注重应用性和经济性方向发展。柔性自动化技术重点是以提高系统的可靠性、实用化为前提，以易于联网和集成为目标。

4、开放化：建立开放式体系结构的数控系统。使系统具有开放性、互操作性、可移植性及互换性。这种开放式的体系结构使得生产商可以在共同的标准平台上建立起广泛的合作，用户则可以根据需要选择最先进的硬件和最新的控制软件，实现最优化系统，这将是新一代数控系统的主流结构。

## 1.3 数控雕刻机及其发展现状

### 1.3.1 雕刻工艺与数控雕刻机

传统雕刻加工业是一门技术性要求很高的手工技艺,雕刻品的质量完全取决于雕刻师的技艺水平,所以生产的效率低、成本高,制品的随意性强、一致性差,严重制约了雕刻行业的发展。这使得雕刻机的产生成为必然。

雕刻机的功能决定了其使用范围。从工艺上,雕刻可分为全自由度空间雕刻、三维立体雕刻和二维平面雕刻。其中,全自由度空间雕刻主要用于一些形状复杂的工艺品或大型艺术作品的雕刻工作,如玉雕、木雕工艺品以及冰雕与沙雕等作品。此类制品往往注重艺术创作性,制品的构成形状复杂、随意性强、工艺性差。因此这类工艺迄今为止雕刻机尚无能为力,只能采用手工雕刻,制品的质量和艺术性完全依赖于雕刻师的技艺水平。相比之下,在三维立体雕刻和二维平面雕刻工艺中雕刻机则大有可为。三维立体雕刻类似于三维铣削加工,可以完成精密模具、艺术浮雕曲面等雕刻加工;而二维平面雕刻工艺主要用于标牌文字及平面几何图形的雕刻加工。目前,三维立体和二维平面雕刻大部分已采用雕刻机完成,克服了传统手工雕刻存在的缺陷。根据控制原理的不同,雕刻机可分为仿形雕刻机和数控雕刻机(采用 CNC 系统)两大类型。

仿形雕刻机的工作原理类似于仿形铣削,在加工前必须制作仿形模型,这一过程通常需手工完成,周期长、效率低。

数控雕刻机是数控技术和雕刻工艺相结合的产物,是一种专用的数控机床。与通用数控机床类似,数控雕刻机通过数控系统根据程序代码控制雕刻机动作,实现雕刻加工的自动化。较传统的手工雕刻、仿形雕刻,数控雕刻具有生产效率高、加工精度高、成品率高、对零件的适应性强等显著优势;同时,借助于专用的雕刻 CAD/CAM 软件系统,加工控制程序的生成快捷、修改方便。因此,数控雕刻机现已成为实现雕刻加工自动化、高效率、高精度的有效手段,也是当今雕刻机的发展主流,广泛应用于机械工业、广告传媒、日常消费以及建筑装潢等众多领域。

根据雕刻对象和应用领域的不同,数控雕刻机可分为模具雕刻机、木工雕刻机、广告雕刻机、激光雕刻机等多种类型。它们的加工性能要求出入很大,对机床和数控系统的要求也各不相同。如模具雕刻机其加工材料为金属,所以对机床本体的刚性要求较高,而且其加工对象是模具,所以对加工系统的精度要求高;而广告机加工的是

一般是塑胶板或有机玻璃等非金属材料，所以对机床刚性和加工系统的精度都没有很高要求。但各类雕刻机都有一个共同的特点，也是数控雕刻机与普通数控机床的一个显著区别，就是由于雕刻刀的特殊性，每次切削的有效成形面积小，所以零件雕刻的刀具运动轨迹很长，加工时间往往也较长。因此，提高雕刻机的刀具运动速度对缩短零件雕刻时间、提高加工效率具有特别重要的意义。

按照伺服驱动控制的类型不同，数控雕刻机又可以分为步进驱动雕刻机和伺服驱动雕刻机。步进驱动属于开环控制，控制精度较低，但价格便宜，适用于对加工要求不高的中低档雕刻机，如木工、广告业的雕刻加工。伺服驱动控制精度高，但价格较贵，主要用于模具加工等高精度雕刻机。

此外，还可根据运动坐标控制的联动轴数，将数控雕刻机分为三坐标数控雕刻机、五坐标数控雕刻机等。三坐标数控雕刻机可以控制三个坐标轴联动，完成浮雕等常规雕刻加工；五坐标数控雕刻机可以联动控制 X、Y、Z 三个移动轴和两个旋转轴，用来完成复杂形状零件的雕刻加工。

### 1.3.2 我国数控雕刻机的发展现状

随着近年来我国制造业的迅速发展，数控雕刻机产业也获得了良好的发展机遇，有效地促进了我国数控雕刻机的生产和推广应用。我国的数控雕刻机起步于经济型数控机床，随着数控技术的进步，经过十多年的发展，已形成了多个国产品牌的雕刻机，如上海洛克公司生产的啄木鸟数控雕刻机、北京精雕公司生产的精雕数控雕刻机和南京科能公司生产的威克数控雕刻机等。上述各类型雕刻机的机床本体结构较为简单，控制器大多借鉴国外新技术，采用基于高档的微控制器或 PC 的数控系统，伺服部分以步进电机细分驱动为主，可获得中等控制精度，但价格比较便宜，因此整机的性价比比较高，适用于精度要求不太高的普及应用场合。对高精度的雕刻加工，目前我国尚以进口数控雕刻机为主，如意大利的左拉、日本的全量等品牌的数控雕刻机。这类数控雕刻机机床本体设计刚度好、精度高，采用伺服电机驱动，加工精度高，控制系统功能全、可靠性高，但价格昂贵，往往数倍于国产产品，因此主要应用于模具等高精度加工场合。



## 1.4 本论文研究意义及内容安排

### 1.4.1 本论文研究意义

雕刻机的数控系统是数控雕刻机的控制核心，其控制功能的强弱、控制性能的优劣直接关系着数控雕刻机的加工质量与加工效率，对整个雕刻机的性价比和市场竞争能力都至关重要。但目前国产雕刻机使用的数控系统在性能和价格上不能很好地统一，成为影响国产数控雕刻机市场竞争力的制约因素之一。为此，研究开发具有良好性价比的雕刻机数控系统很有意义。

本文在充分调研分析国产数控雕刻机现状和市场需求的基础上，与某雕刻机生产厂家合作，以最新高性能 DSP 为核心研制开发新型雕刻机数控系统，以进一步提高国产雕刻机数控系统的性价比，以优良的控制性能和较低的价格进一步增强国产雕刻机的市场竞争力，并为雕刻机最终用户改善产品质量、提高生产效率、节约生产成本提供有效手段。

### 1.4.2 本论文内容安排

本论文围绕市场调研提出的雕刻机数控系统的性能要求，完成控制系统的硬件电路设计和软件开发。在充分论证的基础上，提出了采用 TI 公司的 TMS320F2812 型 32 位定点 DSP 作为控制核心，辅以 CPLD 扩展外围 I/O 和存储器的设计方案，较好地解决了系统的控制性能与成本之间的矛盾。

论文详细介绍了系统的硬件电路、软件流程，还对所采用的插补算法及速度控制技术进行了简要分析。全文共分为七章，各章节内容具体安排如下：

第一章：绪论。综述数控技术的发展历程及发展趋势，综述数控雕刻机的特点和我国雕刻机的发展现状，介绍本文的研究背景和目的。

第二章：系统总体方案设计。介绍本文所要开发的雕刻机数控系统的性能要求和技术指标，以及本文提出的系统总体设计方案。

第三章：插补原理及速度优化控制。介绍本系统采用的插补算法和速度控制策略。

第四章：系统硬件电路设计。分模块介绍本系统的硬件电路设计。

第五章：雕刻机加工程序与参数设置。简要介绍数控雕刻机的编程格式。

第六章：系统软件设计。介绍本系统主控制板和人机界面的控制软件的设计流程。

第七章：总结。总结本文工作，并对后续进一步研发和完善提出自己的建议。

## 第二章 系统总体方案设计

数控雕刻机作为一种专用的数控机床，尽管有多种类型，但从工作原理和控制功能上与数控铣床极为相似，同样，雕刻机数控系统的原理和功能也类似于铣床数控系统。但由于雕刻加工通常采用单点成形，成形面积小、效率低，导致加工刀轨很长，因此，为提高加工效率，对机床的运动快速性要求更高。由此可见，雕刻机数控系统在控制性能上对控制精度和运动快速性较一般铣床控制具有更高的要求。

本章针对数控雕刻机的加工特点，围绕市场调研提出的雕刻机数控系统的性能要求，在充分论证的基础上，对雕刻机数控系统的硬、软件总体方案进行设计、规划，为后续软、硬件开发奠定基础。

### 2.1 系统设计要求<sup>[39]</sup>

通过市场调研，对待开发的雕刻机数控系统归纳出如下功能、性能要求：

1 运动控制：本控制系统适用于三坐标数控雕刻机，其结构简图如图 2.1 所示。基本控制功能是实现 X、Y、Z 三个坐标轴的运动控制，具体包括 X、Y、Z 三轴联动直线插补运动和其中任意两轴的圆弧插补运动控制。

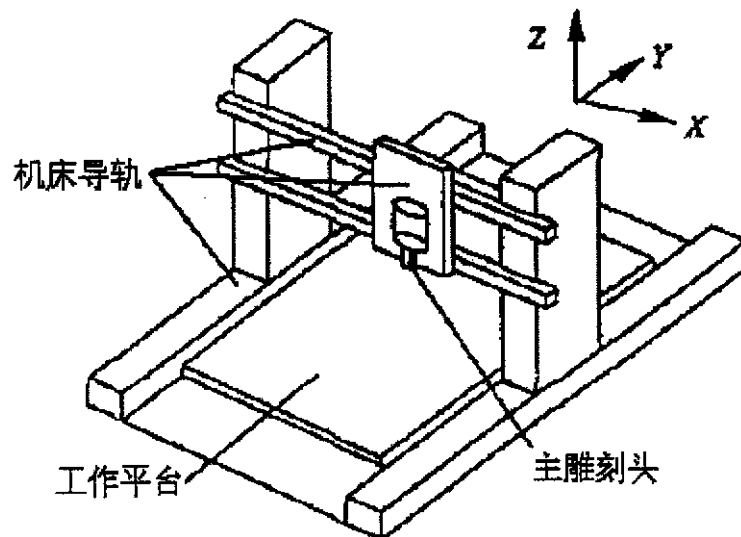


图 2.1 雕刻机的结构框图

2 速度控制：运动的快速性是评价一个雕刻机数控系统性能优劣的关键指标之一。因为数控雕刻机的加工特点是加工面积小、累计运动线路长、启停频繁，不仅要求指令运动速度高，而且要求快加速，以提高雕刻加工的平均运动速度，提高加工效

率。所以，本系统拟定的运动速度指标为：在空行程运动速度 $\geq 100\text{KHz}$ 、加工过程中的插补运动速度 $\geq 40\text{KHz}$ ；当脉冲当量为  $2.5\mu\text{m}$  时可达到的空行程和加工速度分别为  $15\text{m/min}$  和  $6\text{m/min}$ 。

3 主轴控制：主轴通过变频调速，转速可在  $0-30000\text{rpm}$  范围任意调节。宽调速范围便于使用户根据不同的工况和加工切削深度对主轴转速进行调节。一般地，高主轴转速可提供较高的刀具切削速度，有利于改善雕刻刀具的切削能力，获得较好的零件表面光洁度；但有时受加工零件的材质、刀具等因素限制，只能采用低速加工，避免影响刀具寿命。

4 控制精度：为使系统能具有较高的性价比，满足多种类型雕刻机的控制需求，控制系统面向以步进电机细分驱动的伺服控制，脉冲当量可根据具体配套的雕刻机进行设置，常用范围为  $1-10\mu\text{m}$ ，典型值为  $2.5\mu\text{m}$ 。

5 指令格式：雕刻机加工控制程序的指令格式最常用的有 HPGL 和 GM 两种。为使系统能具有广泛的适应性，必须能够兼容以上两种指令格式，即能自动识别和解释 HPGL 和 GM 两种格式的加工文件。

6 PLC 功能：为提供各类雕刻机的辅助控制功能，控制系统需具有 PLC 功能，通过开关量 I/O 实现辅助功能的输入和输出操作控制，如 S、M、T 功能控制、冷却液开关控制等。

7 经济性指标：为使系统能具有更好的性价比和市场竞争能力，控制系统的硬件批量生产成本应尽可能低。

## 2.2 系统总体方案

系统总体方案规划的任务是围绕系统的设计目标，拟定系统的硬件、软件体系结构、确定系统的软硬件划分和开发策略，为系统的具体开发提供指导。总体方案制定得合理与否不仅将直接影响到系统是否能够达到预期得性能指标，还将影响到系统的工作可靠性、开发周期与成本以及系统的后续可维护性、可扩展性等众多方面。

分析本系统的设计指标可知，其目标是要设计开发一套针对雕刻机的控制特点、能满足多种类型雕刻机控制需求并具有高性价比的普及型中档雕刻机数控系统。为此，本系统首先需从速度方面入手，重点要解决好运动的快速性问题，同时兼顾系统的制造成本，使硬件造价控制在预期的范围内。可见，系统的处理速度和成本控制是本系统方案设计应考虑的重点。

根据现有数控技术的发展水平，目前提高数控系统处理速度的途径有以下几种：

1) PC+高速运动控制卡：此方式采用通用 PC 机来完成系统实时性要求不高的

任务；而插补计算、速度控制、位置控制等实时控制要求高的任务由高速运动卡完成。由于 PC 机的软、硬件资源非常丰富，各种应用功能不断升级和加强，所以这种方案可以有效的提高系统处理速度，而且开发过程简便。但系统的价格往往较贵，通常多用于中高档数控系统。

2) 由高性能通用 CPU，如×86、Pentium 等组成的工控板：该方案往往采用实时操作系统，可以直接控制底层硬件，所以具有响应速度快、多轴联动和同步性好等优点，因此可以获得较好的系统性能。但系统中的底层功能模块必须自行开发，工作量大、开发周期长。另外，工控板价格也较贵，同样存在性价比的问题。

3) 高速运动控制芯片：该方案利用高速控制芯片完成插补、升降速等高速处理，从而提高整个系统的处理能力。由于专用运动控制芯片功能强、控制方便，开发者无需考虑具体实时算法，只需将系统的反馈信号正确连接、按规定的时序进行读写即可。但其缺陷在于，开发人员无法针对实际系统需求更改、选用合适的插补等控制算法；而且高速运动控制芯片价格昂贵，所以应用尚不太广。

4) 采用 DSP 等高性能单片机替代高速运动控制芯片：利用 DSP 的高速处理能力，开发合适的功能软件，完成高速运动控制所需的各种运算和控制任务。虽然该方案比方案三的开发难度有所增加，但有利于增强系统开发的灵活性，易于多轴联动控制、实现专用 PLC 的功能，还可以提高技术的保密性。另外，此类芯片属于通用芯片，所以价格比较合适。

通过对以上四种高速数控方案的性能、实现难度、工作量和成本的系统比较，本系统采用了第四方案，即基于高性能 DSP 开发高性价比的雕刻机数控系统。

结合数控雕刻机的功能需求和 DSP 的资源与性能，拟定了本雕刻机数控系统的总体设计框图，如图 2.2 所示。它由基于 DSP 微处理器的运动控制主板、PC 机和人机界面单元三部分组成。

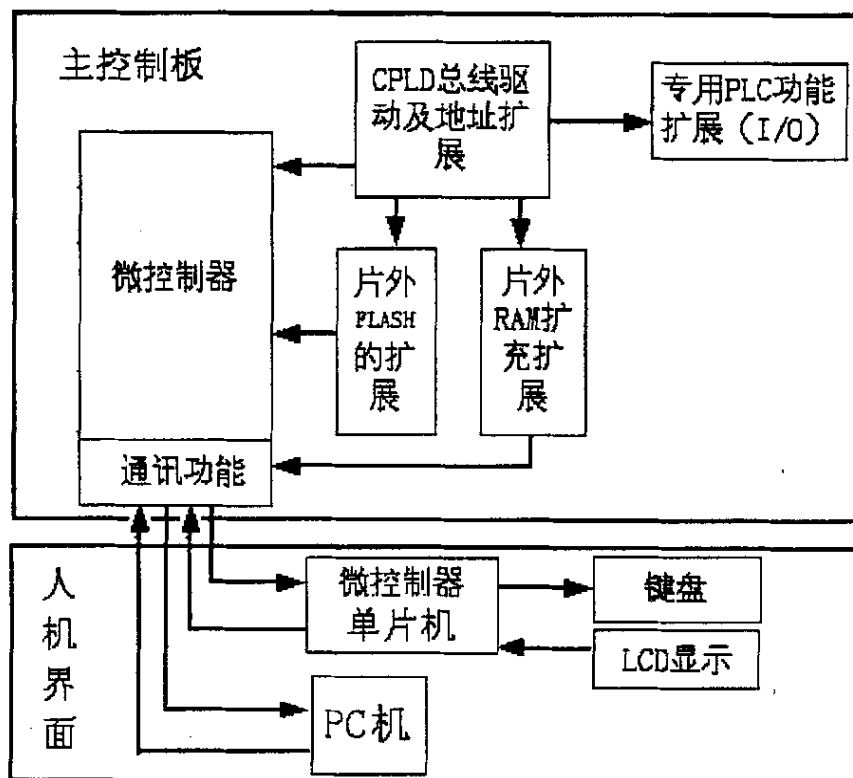


图 2.2 系统总体设计框图

在整个控制系统中，DSP 主控板是数控系统的核心，主控板用来完成了数控系统中的插补运算、输出脉冲的分配，发挥 DSP 高速计算性能，解决雕刻机运动控制过程中的高速信息问题。另外，DSP 主控板还需对外部控制信号不断查询，如机床各轴的限位信号、控制主轴和进给速度的模拟信号等，并根据不同的外部信号完成相应的控制操作。人机界面是机床和操作人员的一个纽带，主要完成操作按键的扫描和加工状态及参数的显示。本系统中 PC 机主要用于完成加工程序的下载。

图 2.2 中，系统主控制板采用 DSP 作为微处理器，完成机床的位置和速度控制；而人机界面单元采用普通 8 位单片机完成加工状态显示和按键的扫描输入。DSP 主控板和人机界面的设计大致可以分为以下七大模块：中央处理器模块、存储模块、输入/输出接口模块、主轴速度数模转换模块、通信模块、人机界面模块和电源模块。

### 一、中央处理器模块

为满足雕刻机数控系统的功能要求和经济指标，必须选择一款运算速度高、高性价比的主控微处理器。目前，单片机的应用非常普及，但常用的 8 位或 16 位单片机，处理数据的能力不强，难以满足本系统的性能要求；而 32 位单片机尽管数据处理能力大大增强，但大多价格较高，而且片上资源有限，需进行较多扩展来满足系统的需求，给系统硬件设计带来很多的不便。经过调研比较，本系统采用了 TI 公司近期推出的 TMS320F2812 为系统的中央处理器，这是一款高性能 32 位 DSP (Digital Signal

Processor), 工作时钟频率可达到 150M, 具有很强的运算能力, 而且片上及外围 I/O 资源丰富, 有利于简化系统设计。

## 二、存储模块

DSP2812 片内资源有 128K×16 bit FLASH、18K×16 bit SRAM。尽管如此, 但对于一个功能复杂的雕刻机数控系统, 这些存储容量仍是远远不够的。为此, 本系统扩展了 8M×16bit FLASH Memory 作为用户加工程序存储器, 1M×16bit SRAM 作为系统的工作存储器。它们通过 CPLD 完成与 DSP 之间读写操作。

## 三、输入/输出接口模块

本系统的输入/输出是通过 CPLD 的逻辑控制来实现的, 以提高系统的工作可靠性和设计柔性。为提高系统应用的灵活性, 系统输出采用了普通输出和差分输出两种方式, 具体方式可由操作人员具体设定。无论输入和输出都通过光耦进行隔离, 进一步提高了系统的抗干扰能力和可靠性。

## 四、主轴速度数模转换模块

雕刻机的主轴转速通过模拟信号控制变频器实现无极调速。由于 DSP2812 片内未带 D/A 数模转换功能, 但有 PWM 输出, 所以本系统中直接利用 DSP 的 PWM 引脚输出的脉冲波经过滤波电路获得平滑的模拟控制信号。通过这种方式取代了 D/A 数模转换芯片, 直接降低了系统的成本。

## 五、通信模块

本系统 DSP 主控板要衔接 PC 机和人机界面单片机, 而这种衔接都是通过串口的方式完成, 所以要求主控板上有两个异步串行通信口。在进行高速插补时, 要保证插补输出与显示通信不会产生冲突, 就必须保证系统具有自主发送的功能, 即 FIFO 功能。常见的控制芯片基本都不具备此功能, 而本系统使用的 DSP2812 主控制芯片具有批发送数据的能力, 能够很好地完成数据的自主发送操作。这也是选用 DSP2812 作为中央处理器的另一个原因。

此外, 为了提高系统的可扩展性, 通信模块还包括了 USB 通信接口, 具体采用的是 Cypress 公司的 CY7C68001 芯片实现 USB2.0 接口的扩展。

## 六、人机界面模块

系统人机界面模块的核心是显示与键盘。本系统采用英文显示的人机显示界面。显示介质采用的是 PDC1604 字符点阵液晶显示模块。该液晶屏视域尺寸为 76.0mm×25.2mm, 阵列是 20×4, 用来完成当前加工状态、加工位置以及相应的加工参数的显示操作。

为了满足系统人机交互的要求, 本系统一共扩展了 33 个按键, 按键扫描和按键键值的读取通过单片机来实现, 然后通过串口传送给 DSP 主控板实现相应的控制逻辑。

辑,从而减轻主控制板的工作负担,专心于雕刻加工的插补和速度控制,进一步提高了机床的可靠性和运行速度。

#### 七、电源模块

本系统中要使用到 5V 和 12V 电源。12V 电源供应给主轴模拟信号输出的功放使用;5V 电源主要为主控制电路、模拟量输入电路和外部信号电路提供电源。本系统的电源模块使用的是多路复合且相互独立的开关电源。

### 2.3 本章小节

经多方详细论证,本系统拟定了基于高性能 DSP 开发高性价比的雕刻机数控系统的设计方案,不仅可充分发挥 DSP 的高速信息处理能力,满足雕刻机数控系统的快速性控制要求,同时,系统的生产成本较低,开发难度适中,设计周期因此也比较短。采用此方案可使设计雕刻机数控系统具有较高的性价比。

### 第三章 插补原理及加速度控制

插补是数控系统实现机床运动轨迹控制的基础。数控系统中插补算法的优劣以及速度控制方法的好坏直接影响到数控系统的加工快速性与加工精度。本章将重点介绍本系统所采用的插补算法及加速度控制方法。

#### 3.1 插补原理<sup>[18,24, 26,34]</sup>

插补过程就是按照给定的加工曲线生成相应逼近轨迹。其任务是按照进给速度的要求，在加工曲线的起点与终点之间计算出若干中间点的坐标值，即数据点的密化过程。此过程中每个中间点的计算时间直接影响数控系统的控制速度，其计算精度又直接影响了数控系统的控制精度。

现有数控系统的插补功能多采用软件方法实现，其中所采用的插补算法优劣将直接决定着数控系统的插补功能强弱和运动控制的性能好坏。一个好的插补算法应该做到：插补所需原始数据少、算法简单、插补精度高、便于控制进给速度。目前使用的插补算法可以分为两大类：一类是脉冲增量插补算法；另一类是数据采样插补算法。

脉冲增量插补算法主要为各坐标轴进行脉冲分配，其特点是每次插补结果仅产生一个行程增量脉冲，以单个脉冲的方式输出给各进给轴的伺服系统，其插补误差不超过一个脉冲增量，常用于以步进电机为伺服驱动的数控系统。

数据采样插补算法又称为时间标量插补或数字增量插补，其特点是数控装置产生的不是单个脉冲，而是数字量。整个插补过程分两步完成，第一步是粗插补，它是在加工曲线的起点与终点之间插入若干点，即用若干段微小直线逼近被插补直线或圆弧。这些等长直线的具体长度由进给速度与插补周期决定。第二步为精插补，对粗插补的每一微小直线再进一步数据密化，相当于脉冲增量插补。该插补方法常用于闭环和半闭环的直流或交流伺服驱动数控系统中。

本系统因驱动采用步进电机，所以使用脉冲增量插补算法。脉冲增量插补算法中较为成熟并得到广泛应用的有以下三种算法：逐点比较法、数字积分法和比较积分法。

逐点比较法又称为代数运算法，其原理是数控系统在进行插补运算过程中，不断地比较插补结果与加工曲线之间的误差，使下一步插补运动向减少误差的方向移动。其特点是运算直观、插补误差小于一个脉冲量，输出脉冲均匀，而且输出脉冲的速度变化小，调节方便，广泛使用于两轴联动的数控机床。

数字积分法又称数字微分分析法（DDA）。数字积分法具有运算速度快，脉冲分配



均匀、易于实现多坐标的联动控制及平面内各种函数曲线的描绘，应用比较广泛。其缺点速度调节不便，插补精度需要采取一定措施才能满足。

比较上述两种算法，数字积分法可以灵活的实现各种函数曲线的插补和多坐标直线的插补，但由于溢出脉冲频率与被积函数大小有关，所以存在速度调节不便的缺点；逐点比较法进给脉冲的频率取决于插补运算频率，因而速度平稳，调节方便，但是使用的便捷性不如数字积分法。而比较积分法则很好的弥补了这两种插补算法中存在的缺陷。

比较积分法又叫脉冲间隔法或目标跟踪法，具体运算方法为在插补过程中不断地比较各坐标轴进给脉冲间隔的大小，根据比较结果进行脉冲分配。这一过程就是以速度快的轴为基础轴，插补过程中基础轴每次送一个脉冲，非基础轴根据公式判别是否送一个脉冲，通过改变动点坐标的瞬时值，使插补矢量始终指向曲线的切线方向，就可以得到各种加工曲线。这种插补算法集数字积分法与逐点比较法的优点于一身，所以能够实现各种函数和多坐标插补运算，且插补精度高，直线插补小于一个脉冲增量，易于调速、运算简单。

本系统要实现三轴联动，并且要求具有快速性，所以合理的插补算法是必不可少的。通过对脉冲增量各种方法的比较，最后选定比较积分法作为本系统插补算法。

### 3.1.1 比较积分法原理

设已知直线方程为  $x_e y = y_e x$ 。求其微分可得  $x_e d_y = y_e d_x$ 。利用矩形公式对微分公式进行代数化可得到  $y_e + y_e + y_e + \dots = x_e + x_e + x_e + \dots$ 。此式可以简化为

$$\sum_{i=0}^{x-1} y_e = \sum_{j=0}^{y-1} x_e \quad (3-1)$$

式 3-1 表明 X 轴方向每发一个进给脉冲，积分值则增加一个量  $y_e$ ；而 Y 轴方向每发一个进给脉冲，积分值则增加一个量  $x_e$ 。为得到一条直线，必须使两个值相等。

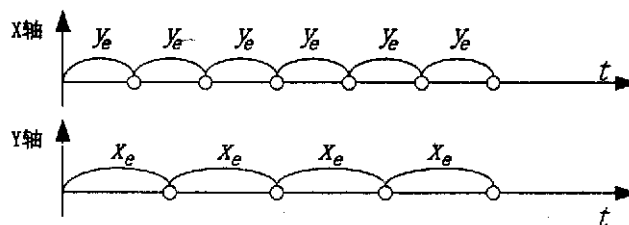


图 3.1 直线插补的脉冲序列示意图

现有一条斜率为  $y_e/x_e$  的直线，现以时间为基准，分别获得的 X 轴和 Y 轴的脉冲序列如图 3.1 所示。以时间间隔为积分增量，X 轴上每隔一个积分增量便发出一个脉

冲，以此得到一个时间间隔  $y_e$ ；而同样 Y 轴上每隔一个积分增量也发出一个脉冲，得到时间间隔为  $x_e$ 。当 X 轴发出  $n$  个脉冲后，获得公式 3-2。

$$\sum_{i=0}^{n-1} y_e = y_e + y_e + y_e + \dots \quad (3-2)$$

同样，当 Y 轴发出  $m$  个脉冲后，获得公式 3-3。

$$\sum_{i=0}^{m-1} x_e = x_e + x_e + x_e + \dots \quad (3-3)$$

要使插补结果是一根直线，则必须使公式 3-2 与公式 3-3 的结果相等。借鉴逐点比较法，此处引入判别函数  $F$ ，令

$$F = \sum_{i=0}^{n-1} y_e - \sum_{i=0}^{m-1} x_e \quad (3-4)$$

由公式 3-4 可知当在 X 轴方向进给一步则  $F_{i+1} = F_i + y_e$ ；若在 Y 轴方向进给一步则  $F_{i+1} = F_i - x_e$ ；若在 X、Y 轴方向同时进给一步则  $F_{i+1} = F_i + y_e - x_e$ 。根据  $F_{i+1}$  的具体值来确定脉冲分配法。此处应用改进后的 SFG（伸雄式函数发生器）的预算程序来实现比较积分插补算法。下面具体介绍本系统所用的直线插补、圆弧插补以及空间直线插补算法。

### 3.1.2 直线的比较积分法插补

现设第一象限直线方程为  $x_e y = y_e x$ ，起点为  $(0, 0)$ ，终点为  $(x_e, y_e)$ 。根据比较积分插补原理可以获得理想的脉冲分配应为：X 轴有  $x_e$  个脉冲，时间间隔为  $y_e$ ；而 Y 轴有  $y_e$  个脉冲，时间间隔为  $x_e$ ，如图 3.1 所示。现取脉冲小的轴为基准轴，即脉冲密度高的轴，每次判别该轴都发出一个脉冲；另一轴就是非基准轴，其具体的脉冲由  $F$  决定。

此处，不妨假设  $x_e > y_e$ ，则有如下判别方法：

若  $F > x_e/2$ ，则同时进给 X、Y 轴。

$F \leq x_e/2$ ，则 X 轴进给一步，Y 轴不进给。

可见，X 轴每次插补都进行输出，并逐次判断 Y 轴是否有脉冲输出（如果是  $x_e < y_e$  则情况相反）。通过这种插补方式，其轨迹精度误差小于半个脉冲当量，插补精度要胜过逐点比较插补法的插补精度。

### 3.1.3 圆弧的比较积分法插补

设已知圆弧方程为  $(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 = x_0^2 + y_0^2$ 。对圆弧方程微分并进行移项可得  $(x_0-x)d_x = (y+y_0)d_y$ 。利用矩形公式对微分公式进行代数化可得到  $y_0 + (y_0+1) + (y_0+2) + \dots = x_0 + (x_0-1) + (x_0-2) + \dots$ 。此式可以简化为

$$\sum_{i=0}^{x-1} (x_0 - i) = \sum_{j=0}^{y-1} (y_0 + j) \quad (3-5)$$

由上可知式 3-5 可以用两组等差数列表示，等式左边数列公差为 -1，右边数列公差为 +1。在插补过程中，X 轴（或 Y 轴）每发出一个进给脉冲后，对被积函数  $x$ （或  $y$ ）进行减 1 或加 1 的修正，并由此可以说明圆弧插补就是沿切线方向的直线插补。具体脉冲分配图如图 3.2 所示。

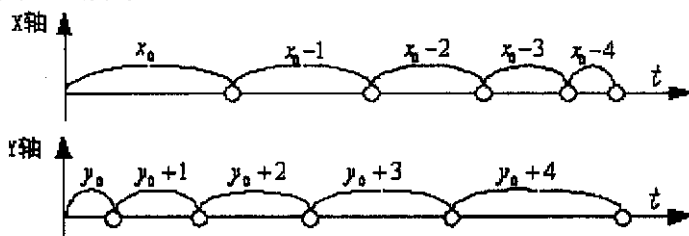


图 3.2 圆弧插补的脉冲序列示意图

圆弧插补具体过程如下：对于以  $(x_0, y_0)$  为圆心，坐标原点为起点的顺时针圆弧，插补矢量是指向动点切线方向的矢量，圆弧插补就是从起点开始沿动点切线方向的直线插补，每进给一步都要及时修改起始位置到中心的坐标值。其修改原则是 X 轴每进给一步，执行  $x_0-1$ ，而 Y 轴每进给一步，执行  $y_0+1$ 。如果为逆圆弧插补则修改方法恰好相反。

### 3.1.4 空间直线的比较积分法插补

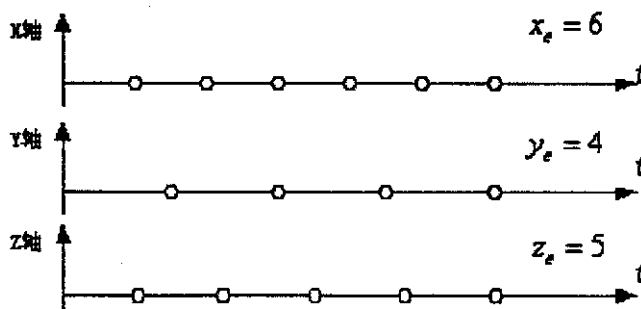


图 3.3 空间直线插补的脉冲序列示意图

空间直线插补是实现三轴联动运动控制的基础。设已知空间直线方程以原点  $(0, 0, 0)$  为起点，以  $(x_e, y_e, z_e)$  为终点，此处假设 X 轴是三个坐标轴中脉冲间隔

最小的,则以 X 轴为基准轴,并且分别建立 XY 坐标系和 XZ 坐标系,然后就空间直线在这两个坐标系内的投影直线分别作直线插补,判别函数分别为  $F_{i+1} = F_i + y_e - x_e$  和  $F_{i+1}' = F_i' + z_e - x_e$ 。通过此方式实现空间直线插补运算。其脉冲序列分配如图 3.3 所示。

### 3.2 加速度控制<sup>[13]</sup>

对于雕刻数控系统,不仅要求能对运动坐标轴的运动轨迹进行控制,还必须能够对运动速度实现控制,以保证加工件的精度和表面质量、减少刀具磨损、提高加工效率。同时,雕刻机数控系统要求具有高速性,为避免雕刻机在启停或加工突变时发生冲击、失步、超程和振荡,数控系统还必须对速度进行加减速控制。

本系统因采用脉冲增量插补算法,所以机床的进给速度控制可通过控制输出脉冲频率来实现。本节具体介绍加速度控制方法。

为了保证雕刻机运动部件的平稳精确定位性,本系统必须对进给脉冲频率进行控制。当速度突然升高时,应保证脉冲频率逐渐增大;相反当速度突降时,应保证脉冲频率逐渐减小。

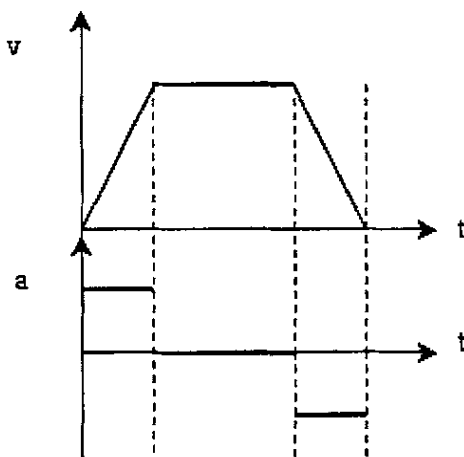


图 3.4 直线加减速控制示意图

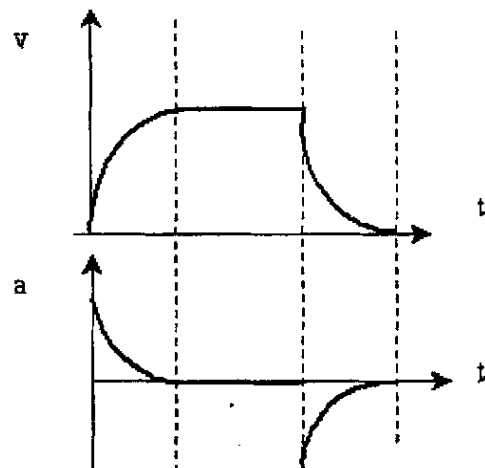


图 3.5 指数加减速控制示意图

加减速处理方法也很多,常用的有<sup>[1][27,28]</sup>: 直线加减速法和指数加减速法。快速进给时速度变化范围大,要求平稳性好,一般采用直线加减速法,使速度突变时,速度沿一定斜率的直线上升或下降,如图 3.4 所示。而在切削进给和手动进给时,跟踪相应要求较高,一般采用指数加减速法,使速度按指数规律上升或下降。如图 3.5 所示。

由于雕刻机比较侧重于系统的快速性,所以本系统中无论处于快速加工或手动进给时,都采用直线加减速法。直线加减速法是通过在位置指令生成算法的具体实施如图 3.6 所示的速度曲线来实现的。图中纵坐标是  $f$ , 单位步/秒,其实就是速度  $v$ 。横

坐标是步数，实际就是位移。步进电机具体运动过程可以如下解释：首先步进电机以起跳频率  $f_0$  运动并且以加速度  $a$  开始加速，经过  $H$  步运行后达到最高运行  $f_H$ ，随后匀速运行直至进入减速区域，并按照减加速度  $\beta$  进行减速，经过  $S$  以后降至  $f_0$  而停止。

在数控技术的设计时，参数  $f_0$ 、 $f_H$ 、 $H$ 、 $P-H$ 、 $S$  都是已知的，需要求的参数是加速度  $a$ ，加速阶段某时刻的步进周期及减速阶段某时刻的步进周期和匀速阶段的步进周期。

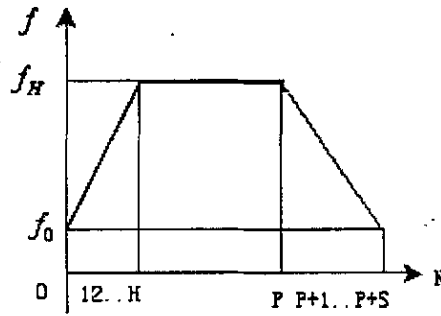


图 3.6 步进电机等加速度控制图

(1) 加速阶段 对于一个线性加速进程，由图 3-35 可得以下表达式：

$$f = f_0 + at \quad (3-5)$$

式中各参数具体的意义如下：瞬时频率  $f$ ；启动频率  $f_0$ ；加速度  $a$ ；加速时间  $t$ 。当步进电机运行  $x$  步，所对应的频率为  $f_x$ ，所用时间为  $t_x$  时，根据运动学方程：

$$x = f_0 t_x + \frac{1}{2} a t_x^2 \quad (3-6)$$

$$\text{于是得： } t_x = (\sqrt{f_0^2 + 2xa} - f_0) / a \quad (x=1, 2, \dots, H) \quad (3-7)$$

同理当步进电机运行  $x-1$  步，对应的频率为  $f_{x-1}$  时，所用时间为  $t_{x-1}$ ，则有

$$t_{x-1} = (\sqrt{f_0^2 + 2(x-1)a} - f_0) / a \quad (x=1, 2, \dots, H) \quad (3-8)$$

那么相邻两个进给脉冲之间的时间间隔  $T_x$  为：

$$T_x = t_x - t_{x-1} = (\sqrt{f_0^2 + 2xa} - \sqrt{f_0^2 + 2(x-1)a}) / a \quad (3-9)$$

但式 (3-9) 中仍含有未知参数  $a$ ，故须求出  $a$ 。为此把达到最高速度对应的频率  $f_H$  和时间  $t_H$  分别代入式 (3-5) 和式 (3-7) 中，并联立方程可得式 (3-10)：

$$a = (f_H^2 - f_0^2) / 2H \quad (3-10)$$

把式 (3-10) 代入式 (3-9) 可得最后表达式：

$$T_x = \frac{2 \left[ \sqrt{H^2 f_0^2 + H_x (f_H^2 - f_0^2)} - \sqrt{H^2 f_0^2 + H(x-1)(f_H^2 - f_0^2)} \right]}{f_H^2 - f_0^2} \quad (x=1, 2, \dots, H) \quad (3-11)$$

由已知条件  $x=1$ ， $T_1 = \frac{1}{f_0}$  以及式 (3-11) 可以推算出以后各步  $x$  ( $x=1 \sim H$ ) 间的步

进时间间隔  $T_x$ 。

(2) 匀速阶段 步进电机达到最高运行频率后进入匀速阶段。此刻时间间隔  $T_x$  为：

$$T_x = T_H = 1/f_H \quad (x=H, H+1, H+2, \dots, P) \quad (3-12)$$

(3) 减速阶段 设其加速度为  $-\beta$ ，负号表示减速。则同上面的分析方法得：

$$\beta = (f_H^2 - f_0^2)/2S \quad (3-12)$$

在步进电机运行了  $x$  步 ( $x=P, P+1, \dots, P+S$ ) 时，对应的时间为  $t_x$ ，有：

$$t_x = (f_H - \sqrt{f_H^2 - 2\beta(x-P)})/\beta \quad (3-13)$$

同理，在步进电机运行了  $x-1$  步时，对应的时间为  $t_{x-1}$ ，有：

$$t_{x-1} = (f_H - \sqrt{f_H^2 - 2\beta(x-1-P)})/\beta \quad (3-14)$$

将式 (3-13) 与式 (3-14) 相减，可得得减速阶段相邻两步的时间间隔  $T_x$  为：

$$T_x = t_x - t_{x-1} = (\sqrt{f_H^2 - 2\beta(x-P-1)} - \sqrt{f_H^2 - 2\beta(x-P)})/\beta \quad (3-15)$$

$\beta$  的值代入式 (3-15) 可得：

$$T_x = \frac{2[\sqrt{S^2 f_H^2 - S(x-P-1)(f_H^2 - f_0^2)} - \sqrt{H^2 f_H^2 - S(x-P)(f_H^2 - f_0^2)}]}{f_H^2 - f_0^2} \quad (3-16)$$

$$x=P, P+1, \dots, P+S$$

由已知调节  $x=P$ ， $T_p = \frac{1}{f_H}$  以及式 (3-16) 可递推算出以后各步  $x$  ( $x=P \sim P+S$ ) 的

步进时间间隔  $T_x$ 。

### 3.3 本章小节

通过比较选择，本系统采用了比较积分法实现加工轨迹的插补运算。较积分法较一般脉冲增量插补法的插补精度要高，且便于速度控制，运算量也不大，有利于提高系统的运动速度。对于加速度控制采用了直线加减速法，能够较好地实现数控系统的升降速控制。

## 第四章 系统硬件电路设计

硬件是系统运行的基础，是实现系统控制功能的必要载体。本章将介绍控制系统的具体硬件控制电路和接口电路设计，以及硬件抗干扰措施等。

### 4.1 主控制模块设计

#### 4.1.1 中央处理器模块<sup>[8,9,10,11]</sup>

CPU 是整个控制系统的核心，它的选择直接决定着整个系统运行处理速度的性能指标，还直接影响着系统硬件电路设计的复杂程度以及系统的性价比等。因此 CPU 的选择是硬件电路设计的首要任务。而系统其它硬件都是围绕着 CPU 来进行扩展设计的。针对本系统的性能和功能要求，经过广泛调研、反复比较，本系统最后采用了 TI 公司的 TMS320F2812 DSP 作为中央处理器。TMS320F2812 是美国德州仪器公司推出的集 DSP 与 MCU 功能于一体的数字处理器。它提供了比目前任何可编程 DSP 控制器高出 12 倍的运算能力。最高运算速度可达每秒 150 MIPS，并且提供 8 级深度的流水线作业模式。因此它可用于对速度要求很高，对实时性要求非常严格的控制系统中，对本系统这样一个典型的高速实时控制系统非常合适。

与现有的 DSP 或 MCU 芯片相比，它具有以下特点：

1、TMS320F2812 是一款 32 位定点 DSP，它不仅拥有数字处理器在运算方面的优势，同时还提供了与一般微处理器（MCU）类似的系统外设集成能力与易用性。

2、TMS320F2812 具有大容量的高速闪存，高速闪存支持可达 85MIPS 的程序执行速度，设计人员能够迅速而实时的访问大量可编程数据，其存储量最高可达 128K 字（具有重要专用算法的代码安全保护功能，可防止偷窃或篡改）。同时片内 RAM 为 18K 字，支持要求更快访问的时间紧迫的代码或数据。

3、TMS320F2812 具有高效的 C 语言编译器，使得编译的程序可读写性好。同时 TMS320F2812 由独特的 IQ 数学函数库提供支持。这种组合使得设计人员能够在短短的几分钟内就可将浮点算法连接到定点处理器，远远优于传统定点设备中冗长而又费时的数学算法转换。

除此之外，TMS320F2812 还集成了以下片内功能：

1、片上集成了 16 路 12 位模数转换器（ADC），其吞吐量高达每秒 1250 万次采样，并具有双采样保持功能，从而能够快速响应紧密的控制环路；

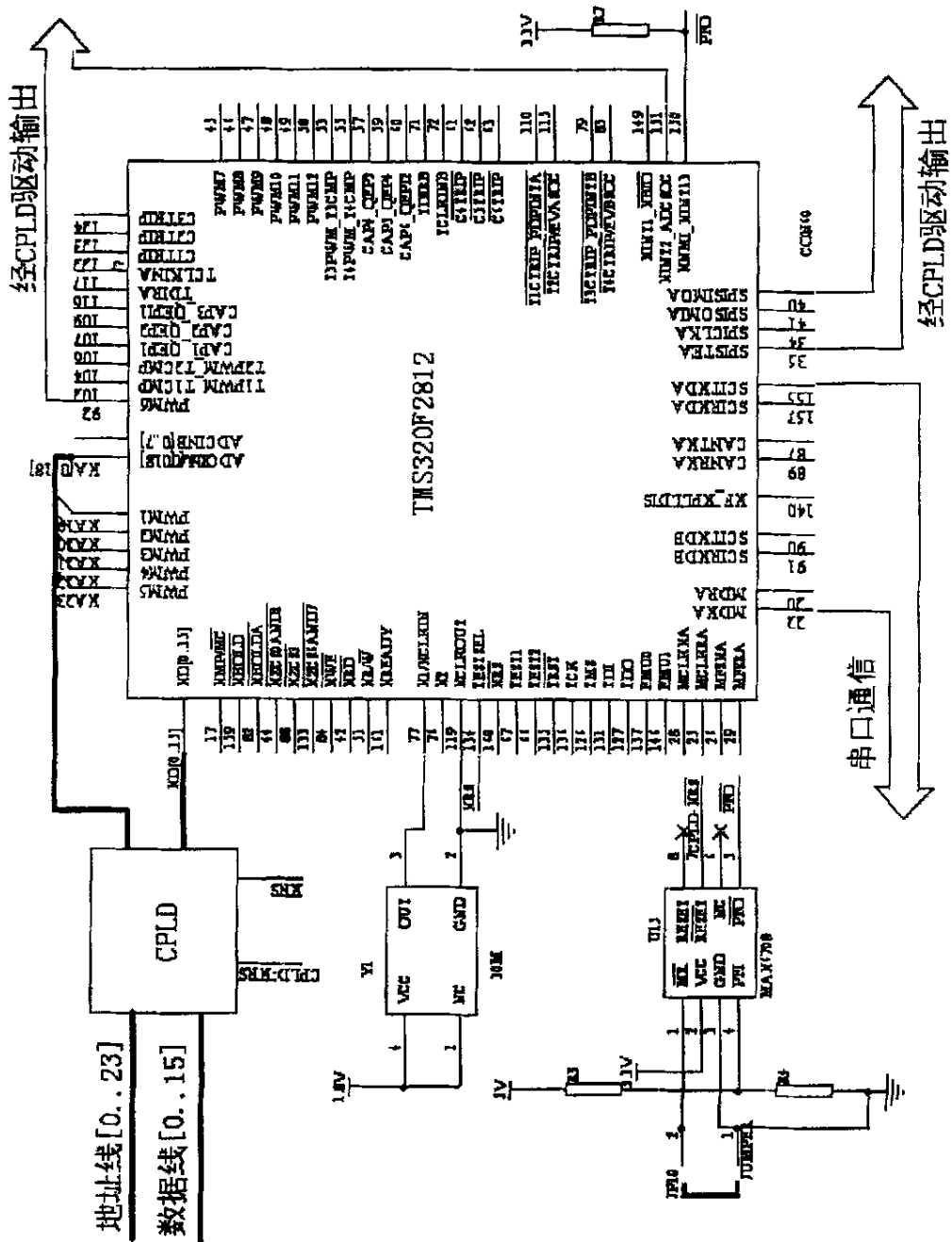


图 4.1 CPU 及其外围电路

- 2、两个事件管理模块，包括 4 个 16 位事件定时器、12 路脉宽调制 PWM 输出通道和 6 路片内光电编码接口电路；
- 3、片上集成 2 路串行通信接口；
- 4、基于锁相环的时钟发生电路；
- 5、片内集成 3 个 32 位通用定时器；
- 6、看门狗定时器模块。



此外，片内还有 1 路 MCBSP 同步串口、1 路 SPI 同步串口和 1 路 eCAN 总线。

#### 4.1.2 电源监控和复位电路

为了能够对系统做到全方位的保护，本数控系统在系统断电时，要求能够自动保护加工数据和加工参数。为此，本系统采用了 MAX6708 微控制器电源监控芯片，它同时还能在手动复位时提供 /RESET 信号。

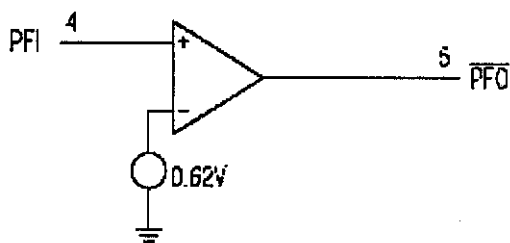


图4.2 电源监控原理

MAX6708 是一款低电压的微处理器电源监控芯片，其采用 SOT23 封装，并带有电源失效输入输出手动复位及看门狗定时器的功能。本系统没有使用到 MAX6708 芯

片的看门狗定时器功能。MAX6708 的电源监控和手动复位的工作原理分别如图 4.2 和如图 4.3 所示。

由图 4.2 可知，该芯片的电源监控利用了比较器的原理。当上电后系统获得一个 0.62V 的电压基准，通过和 PFI 引脚的输入电压进行比较，比较值从 /PFO 引脚输出。处理器通过 /PFO 信号完成相应的保存操作。

该芯片的复位原理是，当电源  $V_{CC}$  低于门阙电压  $V_{TH}$  (查表 4.1) 或复位按钮保持低电平的时间超过  $t_{MD}$  时，/RESET 引

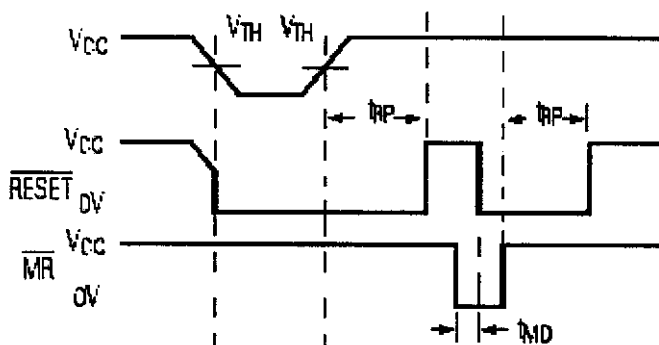


图4.3 芯片上电复位和手动复位原理

脚由高电平变为低电平，直到  $V_{CC}$  再次高于门阙电压  $V_{TH}$  或复位按钮转为高电平，并经过  $t_{RP}$  (查表 4.1) 延时后转为高电平。

表 4.1 MAX6708 具体参数值

差数	级大值 MAX	典型值 TYP	极小值 MIN	单位
$V_{TH}$	3.00	2.93	2.85	伏 (V)
$t_{RP}$	280	200	140	毫秒 (ms)
$t_{MD}$		200		纳秒 (nm)

## 4.2 存储模块设计<sup>[25,27,28]</sup>

本系统加工时有两种途径获得加工数据（NC 程序），一是通过 PC 机下载数据；另一种途径是调用系统内部已经存储的加工数据。TMS320F2812 虽然内部有 128K FLASH，但是这用来存储加工数据显然是不够的，所以要扩充 FLASH 存储器。此外，由于 FLASH 的读取速度较慢，在系统进行加工的时候，不可能每条数据都从 FLASH 内读取，否则会影响系统的运行速度。为了提高系统的运行速度，设计思路是在加工前尽可能多的将加工数据读入 SRAM 内，为此系统还需扩展 SRAM 存储器。

### 4.2.1 存储器的选定

根据实际要求，通常一个普通的雕刻机程序小于 1M 存储空间，而在系统内部还需保存若干个常用的加工程序代码，本系统最多可达 8 个。因此，本系统需扩展 8M $\times$ 16bit 的 FLASH 存储器和 1M $\times$ 16bit 的 SRAM 存储器。其中采用 16bit 字宽是因为尽管 MS320F2812 是 32 位定点 DSP 处理器，其数据的存储和读取都是 16 位字宽。

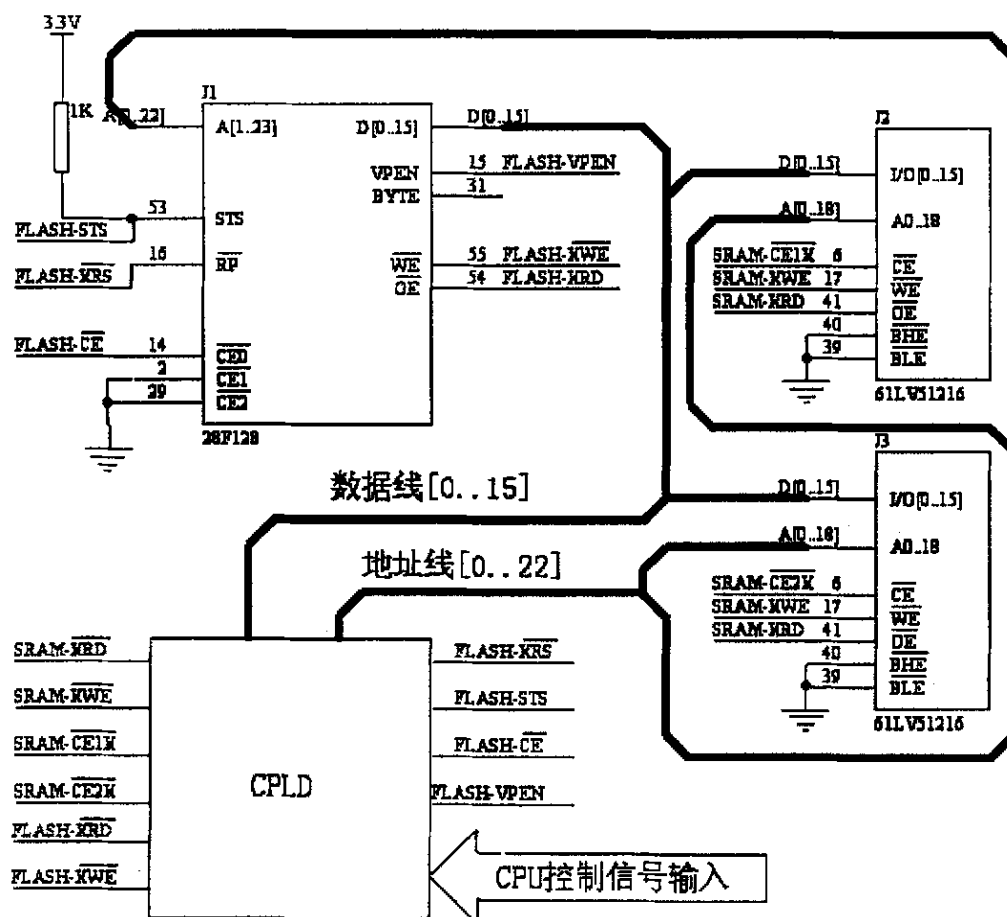


图 4.4 存储器扩展电路框图

系统设计时，扩展了两片 ISSI 公司的 61LV51216 静态读写存储器来构成 16Mbit

的 SRAM。61LV51216 是一种低压低功耗的 SRAM，可以用系统 3.3 电压直接供电；另外，此芯片的读写周期最大不超过 12 个 ns，与 DSP 之间无需插入等待周期便可进行读写操作。系统扩展的 8M×16bit 的 FLASH 芯片是英特尔公司的 28F128 快擦写可编程只读存储器。具体的存储器电路框图如图 4.4 所示。

#### 4.2.2 存储器译码电路和空间分配

TMS320F2812 外部存储器接口包括 19 位地址总线，16 位数据总线，及 3 个片选信号和读/写信号。三个片选信号映射到 5 个外部存储区域，Zone 0、1、2、6、7（查看表 4.2）。其中 Zone 0 和 1 共用一个片选信号 XZCS0AND1，而 Zone 6 和 7 共用一个片选信号 XZCS6AND7，Zone 2 独用一个片选信号 XZCS2。这五个存储区域可以设置为不同的等待周期。本系统采用 Zone 6 作外部存储区域。由于本 DSP 可以直接寻址 512K 地址空间，地址从 00000H—7FFFFH，要完成 1M SRAM 和 8M FLASH 地址查询必须通过分页方式。系统设计中，利用 DSP 的读写引脚和 GPIOA0—GPIOA5 以及 GPIOB4 引脚经过 CPLD 电路进行译码，完成对 SRAM 和 FLASH 的读/写操作。

本系统中存储器地址译码采用 Altera 公司的 CPLD 器件 EPM7128SQC100-10 完成，具体存储器的使能译码逻辑如表 4.3 所示。

表 4.2 DSP 片内存储区域

存储区域	空间	起始—终点地址	片选控制
Zone 0	8K×16bit	0X002000-0X003FFF	XZCS0AND1
Zone 1	8K×16bit	0X004000-0X005FFF	XZCS0AND1
Zone 2	512K×16bit	0X080000-0X0FFFFFFF	XZCS2
Zone 6	512K×16bit	0X100000-0X17FFFF	XZCS6AND7
Zone 7	16K×16bit	0X3FC000-0X3FFFFFFF	XZCS6AND7

表 4.3 DSP 外部扩展存储地址译码表

CPLD 输入	CPLD 输出			起始—终点地址
	SRAM-CE1X	SRAM-CE2X	FLASH-CE	
00000	1	0	0	0X100000-0X17FFFF
00001	0	1	0	0X100000-0X17FFFF
1xxxx	0	0	1	0X000000-0X800000

### 4.2.3 28F128 FLASH 介绍

Intel 28F128 是一种采用 CMOS 工艺制成的  $8M \times 16\text{bit}$  的 FLASH。此芯片读写访问时间为 150ns，此读写周期已经大于 DSP 对外部端口的读写周期。为了能够和 DSP 的读写周期进行匹配，在对 FLASH 进行读写操作过程中必须插入等待周期。28F128 同样是 3.3V 低电压驱动芯片，直接可由系统控制电源进行供电。28F128 内部存储区域分为 128 个 64K WORD 的页面，支持整体擦除和分页擦除两种擦除方式。为了避免总线冲突，芯片上有三个使能引脚 ( $\overline{CE2}$ 、 $\overline{CE1}$ 、 $\overline{CE0}$ )。对 28F128 进行任何操作之前必须合理配置此三个使能引脚的电平。具体配置方式查看表 4.4。

由于本系统中只使用到一块 FLASH，不存在对多 FLASH 芯片进行片选操作，所以采用表 4.4 中的方式 1，将  $\overline{CE2}$ 、 $\overline{CE1}$  直接接地，由  $\overline{CE0}$  完成片选任务。

表 4.4 FLASH 芯片使能引脚操作表

$\overline{CE0}$	$\overline{CE1}$	$\overline{CE2}$	Flash 使能
0	0	0	片选成功
1	0	0	片选成功
1	0	1	片选成功
1	1	0	片选成功

#### 4.2.3.1 28F128 状态寄存器介绍

Intel 28F128 芯片内有一个可读状态寄存器，用来标志当前芯片工作状态。在完成编程或擦除操作以后，芯片会自动转为寄存器读模式，在数据总线上读出的就是状态寄存器标志字的具体内容。

7	6	5	4	3	2	1	0
WSMS	ESS	ECLBS	PSLBS	VPENS	R	DPS	RESERVED

图 4.5 状态字中每一位的定义

状态寄存器的各位定义如如图 4.5 所示。每一位数据的具体含义如下：

位	名称	描述
7	WSMS	芯片进行写操作时候的状态标志位 0 代表等待进行写操作；1 代表正在进行写操作。
6	ESS	芯片进行擦除悬挂操作的状态标志位

		0 代表写擦除操作完毕或正在进行擦除操作；1 代表擦除处于悬挂状态
5	ECLBS	数据擦除操作或保密位擦除的状态标志位 0 代表擦除成功；1 代表数据擦除操作或保密位擦除出现错误
4	PSLBS	数据写入操作或保密位设置的状态标志位 0 代表保密位设置成功；1 代表设置保密位时出现错误
3	VPENS	编程电压状态标志位 0 代表具备编程电压；1 代表电压过低，无法进行写操作
2	R	芯片进行编程悬挂操作的状态标志位 0 代表写写操作完毕或正在进行写操作；1 代表写操作处于悬挂状态
1	DPS	芯片是否被密码保护状态标志位 0 代表未采取任何保密措施；1 代表芯片处于保密状态
0	RESERVED	此位保留。

4.2.3.2 28F128 的读操作、写操作和擦除操作

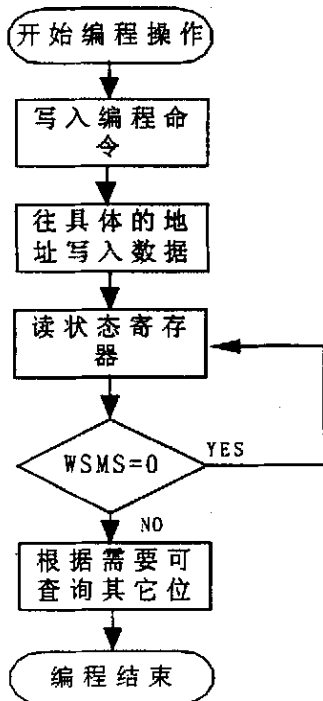


图 4.6 28F128 的写操作流程

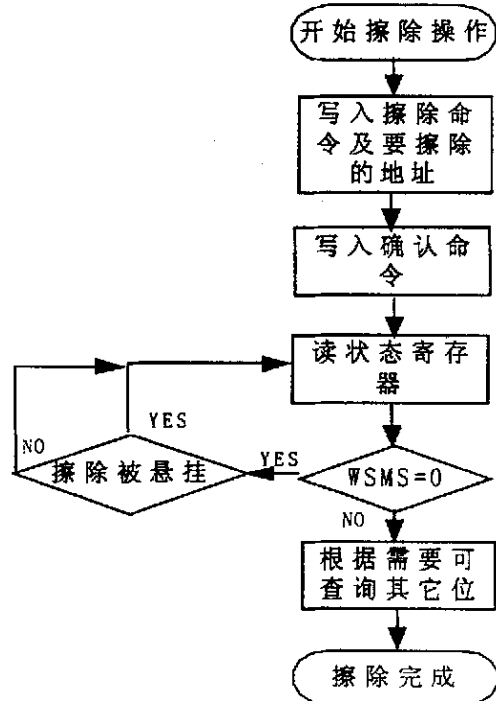


图 4.7 28F128 的擦除操作流程

28F128 的读操作。FLASH 的读操作过程完全与访问普通 RAM 的读操作过程相同，

唯一注意的是要在读操作周期内插入等待周期，从而做到时序周期匹配。

28F128 的写操作。FLASH 的写操作过程流程如图 4.6 所示。写操作是否结束通过查询状态寄存器的第七位标志位来标志。

28F128 的擦除操作。此芯片支持整片擦除和分页擦除，此两种方式完成擦除操作的原理完全相同，只需写入不同的擦除命令字即可。擦除流程如图 4.7 所示。

### 4.3 输入/输出接口模块<sup>[27,28]</sup>

TMS320F2812 是系统电压为 3.3 的低电压处理器，驱动能力较弱。而本系统外接输出负载比较多，考虑到信号的驱动能力以及主控制板设计的灵活性，所有输出信号都经过 CPLD 进行二次设计后输出。考虑到 CPLD 引脚有限，输入信号采用光电隔离后直接和中央处理器连接。

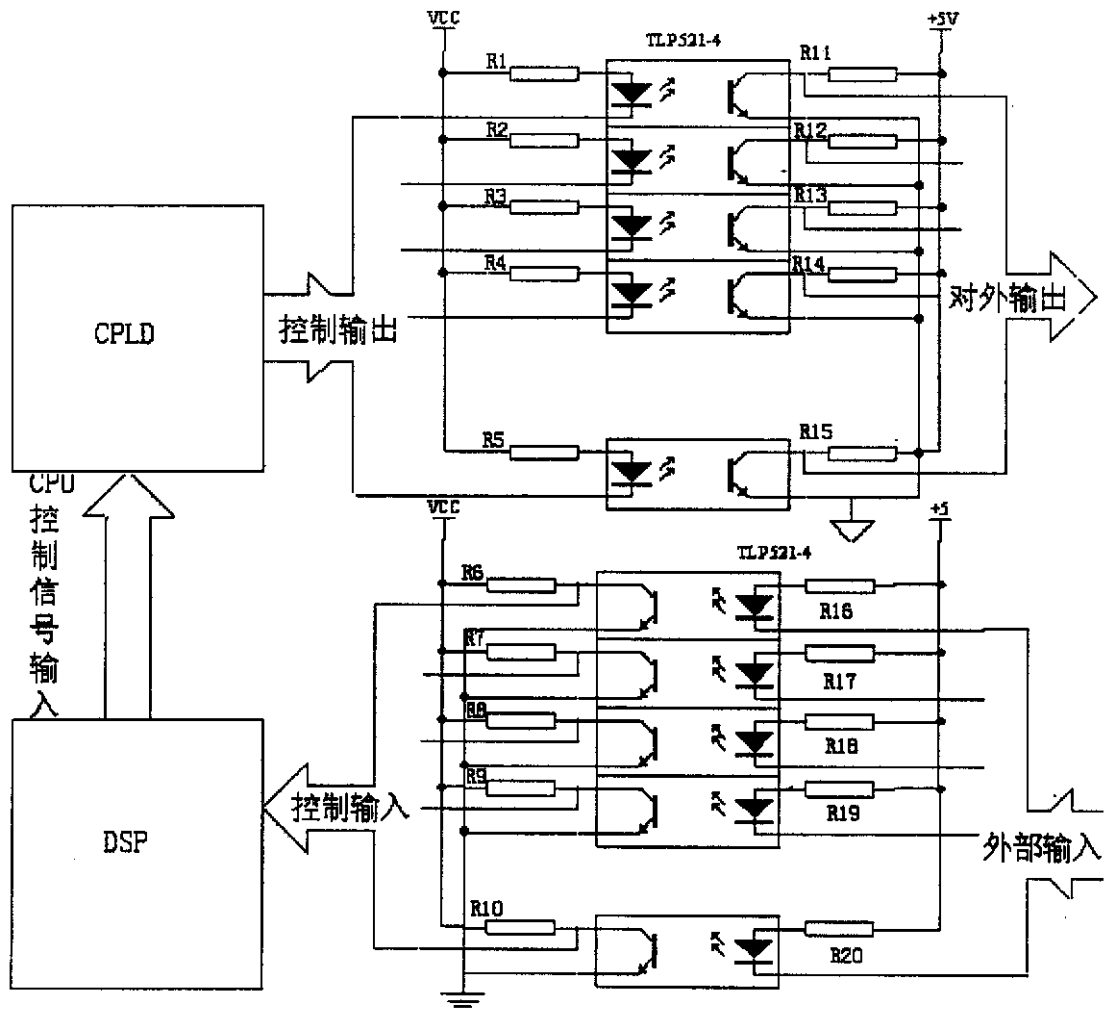


图 4.8 开关量输入输出电路框图

### 4.3.1 开关量输入输出接口设计<sup>[27,28,39]</sup>

按照系统性能要求，系统共设计有 8 路开关量输出和 16 路开关量输入，具体的输入输出电路框图如图 4.8 所示。此处的开关量输出主要用来驱动继电器实现一些强电设备的启/停操作。值得注意的是，此处输出的开关量信号驱动能力较弱，尚不能直接驱动继电器，还须增加驱动器，本系统的驱动器电路在主控制柜里，此处不再详述。

系统中 16 路开关量的输入主要反映机床的当前状态。应用中的开关量的输入类型包括机械式行程触点开关、槽式光电开关和普通按钮式开关等。为保证系统的适应性，不仅提供了必要的开关量输入，还设计了便于以后扩展的备用开关量输入。具体的开关量输入定义如表 4.5 所示。

表 4.5 开关量输入信号查询表

输入	具体功能	输入	具体功能
1	X 轴正向运动限位开关	2	X 轴负向运动限位开关
3	Y 轴正向运动限位开关	4	Y 轴负向运动限位开关
5	X 轴正向运动限位开关	6	Z 轴负向运动限位开关
7	对刀块对刀位置信号开关	8	急停信号开关
9、10	备用轴正向、负向运动限位开关	11-16	备用开关量输入

### 4.3.2 电机输入接口设计

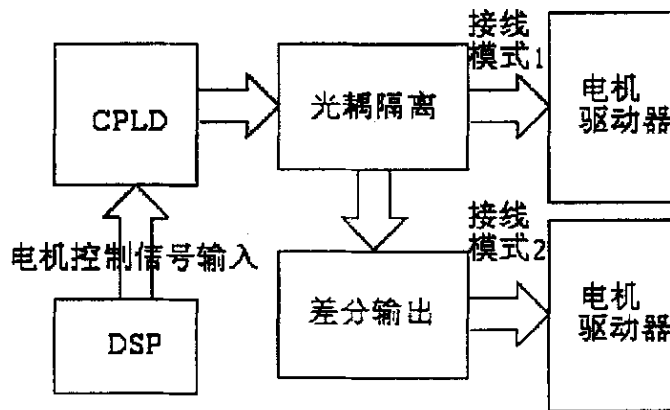


图 4.9 电机输入接口电路框图

本雕刻机系统采用的驱动电机是步进电机，每个步进电机需要两路控制信号，分别用来进行位置控制和方向控制。本系统具有四轴联动控制功能，共 8 路电机控制信号输出。它们分别是 X 轴、Y 轴、Z 轴和 A 轴的位置和方向控制信号。在本设计中

只使用了 X 轴、Y 轴和 Z 轴进行三轴联动控制，而 A 轴为以后系统进行扩展提供方便。电机输入接口电路框图如图 4.9 所示。

本系统中任何输出都经过光耦隔离，此处也不例外。通过这种方式保障控制系统尽可能的不受外界干扰。本系统支持步进电机多种输入控制模式，支持普通的输入模式，还提供差分输入模式，具体的输入模式根据具体的接线而定，如图 4.9 所示。本系统在普通输入模式下还支持多种步进电机的控制方式，包括 P-P 和 P-D 控制方式，具体使用的电机控制方式由人机界面中的电机工作方式参数设定。

#### 4.4 主轴速度数模转换模块<sup>[29]</sup>

第二章已经提到，本系统采用了 PWM 控制加滤波器获得主轴控制所用模拟量，代替常规设计中的 D/A 数模转换芯片。具体实现电路如图 4.10 所示。

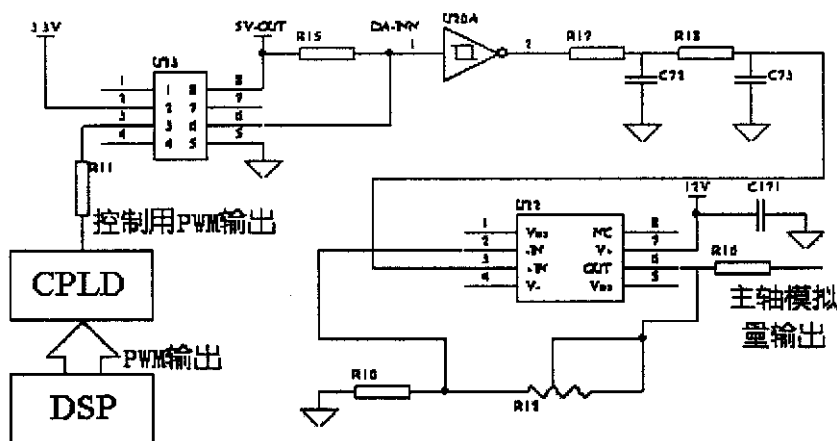


图 4.10 产生模拟量的电路框图

图中，模拟量信号由 DSP 内部的脉宽调制器输出脉宽调制方波（PWM 波）经 CPLD 驱动后接光耦输入端，经光耦隔离后接施密特触发器 U20 提高抗干扰能力，再经无源滤波器进行滤波成为与 PWM 占空比成正比的模拟电压信号，最后由运算放大器 U22 驱动输出给变频器，实现机床主轴的调速控制。

TMS320F2812 利用事件管理器就可以产生频率和脉宽可变的 PWM 波，由于事件管理器使用的是 16 位定时器，方波的最高分辨率可以达到 1/62256（16 位）。对事件管理器设定的基本步骤是：先设置 PWM 波输出高电平有效，然后设置定时器周期寄存器 EvxRegs.TxPR（设定脉冲频率），最后设置定时器比较寄存器 EvxRegs.CMPRx（设定脉冲宽度）。当 EvxRegs.CMPRx=0 时，输出模拟量电压值为 0V；当 EvxRegs.CMPRx=EvxRegs.TxPR 时，输出模拟量电压值为最大值。

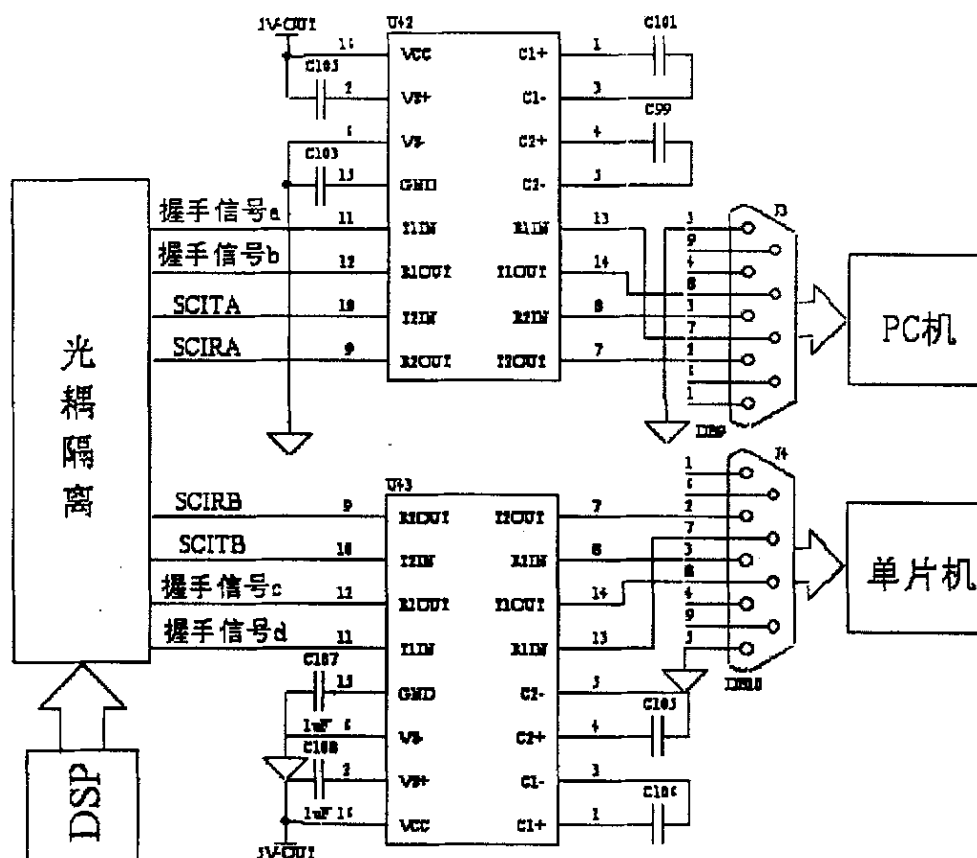
图中，放大部分使用运算放大器构成同相比例运算电路。根据同相比例运算电



路中电压放大倍数公式  $A_u = 1 + \frac{R12}{R10}$  可得, 调节 R12 阻值可以获得不同的模拟电压最大值, 本系统中模拟电压输出最大为 5V。

#### 4.5 通信模块<sup>[27,28]</sup>

本系统采用两个异步串行通信口衔接主控制板和人机界面。为了确保通信数据的正确性, 本系统采用五线制的通信方式, 具体的电路框图如图 4.11 所示。图中, DSP 串口通信信号的 TTL 电平都经过光耦隔离实现电平匹配; 通过 MAX232 芯片转换成标准 RS232 通信信号, 实现与人机界面的正常通信。



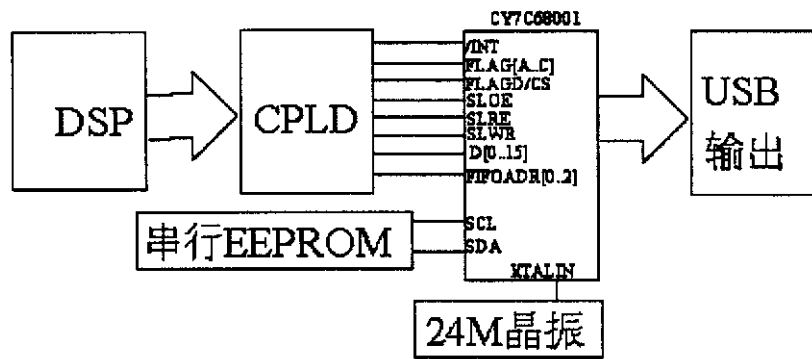


图 4.12 USB 通信电路框图

图中，串行 EEPROM 用来初始化配置 USB。初始化 USB 有两种自举方式：通过串行 EEPROM 自举和由处理器上电初始化自举。本系统采用前者，因为采用串行 EEPROM 自举是一种独立的 USB 自举方式，可以与处理器并行工作，从而提高系统初始化速度。具体的初始化顺序查看表 4.6。

表 4.6 利用串行 EEPROM 实现 USB 初始化顺序表

步骤	具体操作过程
1	往相应的寄存器写入 0X4C 通知 EZ_USB_SX2 有一个有效的 EEPROM 存在
2	设置 IFCONFIG 寄存器
3	设置各个信号的级性
4	判断的寄存器值来决定是否从 EEPROM 中装入初始化表
5	用两个字节的空指示 EEPROM 的自举数据的大小
6	读自举描述表的具体内容

## 4.6 人机界面模块

一个数控系统能否被广大的用户接受，友好的人机界面是必不可少的。本系统设计的人机界面具有直观、简洁、鲜明的特点，主要由 PC 机界面和单片机界面构成。PC 界面是基于通用 PC 的平台上完成的，无需涉及到具体硬件电路的设计，此处只介绍基于单片机的人机界面模块，包括显示和按键两大功能模块。

### 4.6.1 显示模块

在现有的雕刻机控制系统中，常用的显示介质有数码管显示（LED）、液晶屏显示（LCD）和 CRT 显示。早期的雕刻机系统常使用数码管作为显示界面，采用数码管显示方式虽然成本较低，但是显示内容简单、界面枯燥，已经基本被淘汰。而采用

CRT 显示则接口过于复杂，只是使用在某些高档的雕刻机控制系统中。考虑性价比，本系统以液晶屏作为显示界面。液晶屏是一种被动显示器件，即显示器的明亮度与环境的亮度成正比关系，因此在黑暗环境下要配备背光源。本系统采用的是字符点阵液晶显示屏 PDC1604。该液晶屏能显示 20×4 的 5×8 点阵字符，自带背光源，输入控制电源只需单电压输入。此液晶屏控制器与 HD44780 或 KS0066 液晶控制器兼容。PDC1604 与单片机的接口电路如图 4.13 所示。

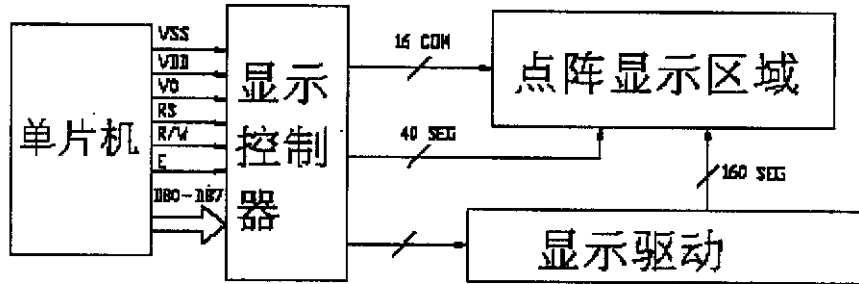


图 4.13 液晶屏接口电路框图

#### 4.6.2 键盘模块

表 4.7 功能按键表

按键	具体功能	按键	具体功能
0—9	数字键，用来键入具体的数值		小数点的键入和坐标保存按钮
—	负号键，用来键入负号	三轴方向键	用来控制 XYZ 具体的运动方向
+	XYZ 三轴运动加速按键	Man	进入手动界面按钮
Auto	进入自动界面按钮	取消键	取消当前操作
确认键	执行当前操作	回零键	控制机床进行回零操作
设置 XY 原点	用来设置 XY 轴的工件坐标原点	设置 Z 原点	用来设置 Z 轴的工件坐标原点
调用坐标	调用合理的工件坐标	冷却液按键	用来控制冷却液电机的启停
主轴开关	启动主轴进行高速旋转	暂停	将当前加工状态转为暂停状态
暂停启动	完成暂停后继续加工的操作	启动	进行自动加工按钮
退出	在暂停状态直接退出加工状态		

键盘模块是基于单片机的人机界面的另一重要部分。与一般数控机床不同，雕刻机通常没有手动程序输入功能，加工程序由电脑通过编程系统软件生成，因此相对于一般数控系统，雕刻机使用的键盘比较简单，本系统共设计了 33 个功能按键，按键的定义如表 4.7 所示。

键盘扫描的具体电路如图 4.14 所示。图中键盘的行扫描和列扫描由单片机完成。如有按键事件发生，单片机将扫描获得的键值通过 RS232 串口通道发送给 DSP 主控制

板，由主控板实现相应的控制。

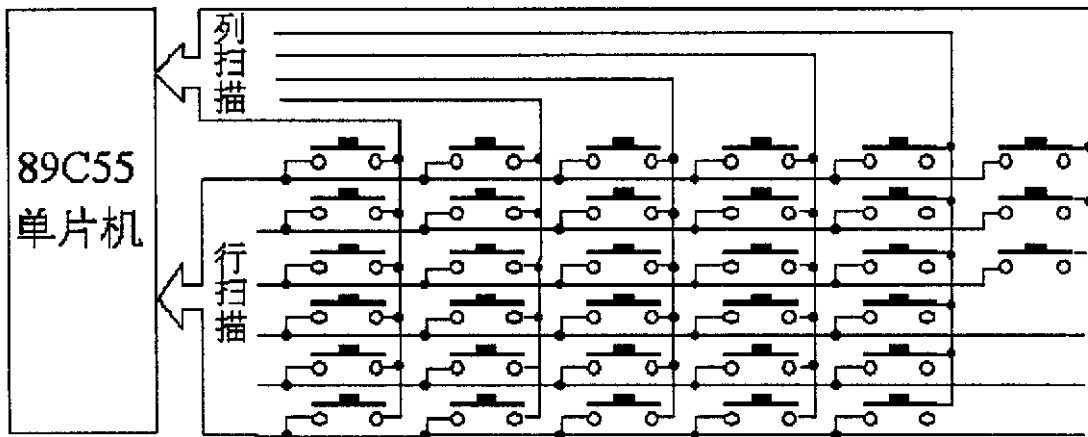


图 4.14 键盘电路框图

#### 4.7 电源模块

良好的电源模块是系统稳定可靠工作的前提条件，特别在本系统中控制对象为电机，电机的启停会对电源产生干扰。本系统采用开关电源供电，它具有效率高、体积小、输入电压范围宽等特点，同时也可以很好地排除电机启停对电源产生的干扰。

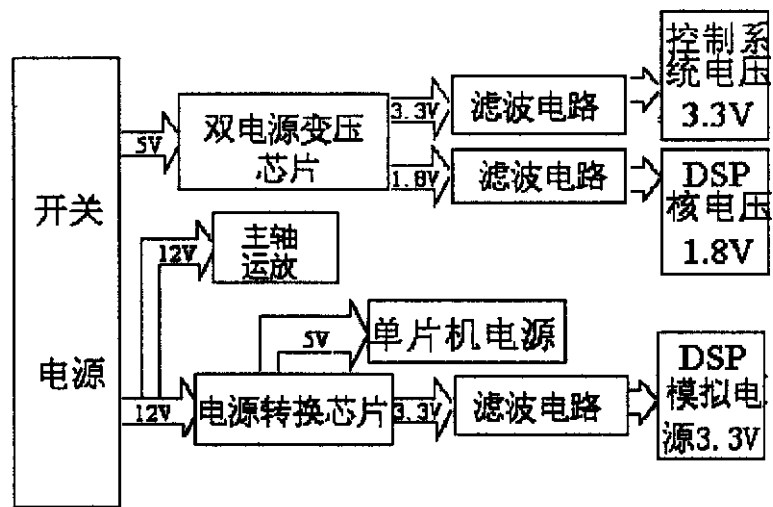


图 4.15 电源电路框图

本系统的开关电源能为主控板提供独立的 5V 和 12V 电源。设计中，通过恰当的滤波、隔离等措施确保内部电源和外部电源互不干扰。具体的电源框图如图 4.15 所示。

在图 4.15 中，DSP 主控制板的内部控制电源和单片机以及模拟量外部输入电源是独立的，这样不仅提高了系统的抗干扰性，还避免由于外部电源的影响导致内部控制芯片烧毁的不良后果的产生。

## 4.8 硬件抗干扰措施<sup>[28]</sup>

实际工作中，雕刻机的控制系统所处的工作环境非常恶劣，如果不对系统采取有效的抗干扰技术，系统将难以可靠正常运行，直接影响到系统工作的可靠性、稳定性。一般而言，影响系统可靠性的因素主要有以下几个方面：控制系统内部设计存在问题导致干扰、电源的干扰、数据通道之间的干扰、电磁干扰及温度、湿度的干扰。除第一个是系统内部问题，剩余都是系统可靠性设计方面的问题。

要解决系统干扰问题首先要找到干扰源，然后再采用硬件和软件措施消除或削减干扰源对系统的干扰。此处介绍本系统采取的硬件抗干扰措施。

具体硬件抗干扰主要措施如下：

(1) 采用良好的电源供电可以提供整个系统的可靠性。本系统中具体使用的电源在前面章节已经介绍，此处不再赘述。

(2) 进行电路板设计的时候采用多层电路板，为电源和地提供独立的电源层和接地层。避免电流通过电源线和地线时产生压降导致电源不稳定。本系统设计电路板时采用的是四层板，确保电源能够稳定供电。

(3) 模块化供电，如图 4.16 所示。通过这种供电方式可以使各模块之间的电位相等。相反如果采用如图 4.17 所示集中供电模式，则在每个模块之间就会存在压降，使得各模块之间的干扰逐级增大。本系统采用了第一种供电方式。

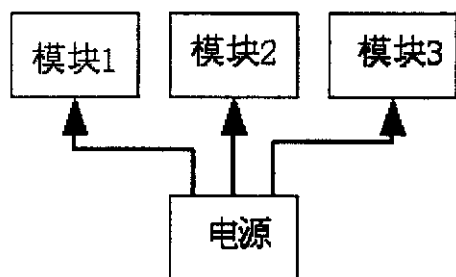


图 4.16 模块供电示意图

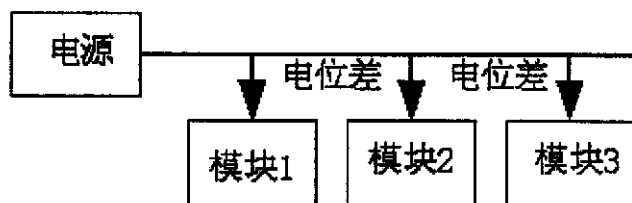


图 4.17 集中供电示意图

(4) 在每个接电源正极的引脚输入端与地之间增加 0.01—0.1 $\mu$ f 的去耦电容；每个芯片的电源并联 0.01—0.1 $\mu$ f 的去耦电容，通过这种方法可以有效的解除引脚之间、芯片之间存在的干扰。

(5) 提高总线驱动能力。在一个系统中有很多器件都是采用总线读写方式，而总线的负载能力是有限的，必须通过驱动芯片提高总线驱动能力。本设计中采用将总线通过 CPLD 增加驱动能力来解决总线的驱动问题。

(6) 光电隔离消除外部干扰。系统的输入输出通道是干扰信号窜入的另一个途径。系统设计中分别对每一路输出和输入信号经过光耦隔离，阻断外部信号进入控制系统。

#### 4.9 本章小节

通过反复斟酌, 仔细对比、精心设计, 完成了雕刻机数控系统硬件电路的设计开发, 实际电路板见附录 1。通过与软件的联调验证, 本系统的硬件电路运行可靠稳定, 具有实用价值。

## 第五章 雕刻机加工程序

雕刻机程序的编写与数控机床程序的编写基本相同，但也有其特殊性。特别是 HPGL 图形代码在通用数控系统中一般不采用。由此在进行系统软件设计介绍之前，必须首先介绍本系统所支持的雕刻机加工程序的格式。

### 5.1 雕刻机加工坐标系

数控雕刻机的坐标系统定义是加工编程的基础，也是数控系统实现加工控制的基础。本数控系统支持两个坐标系统：机床坐标系和工件坐标系。具体示意图如图 5.1 所示。

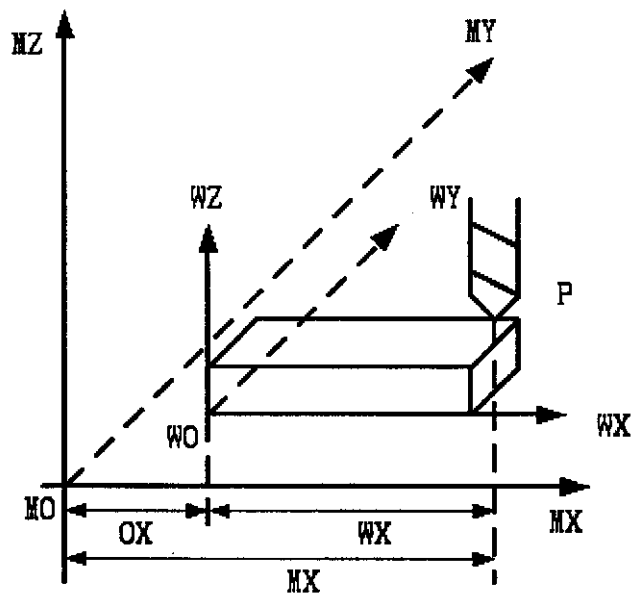


图 5.1 系统坐标示意图

图中，MO 代表机床坐标系的原点；WO 代表工件坐标系的原点，它在机械坐标系中的坐标为 (OX, OY, OZ)；P 点代表实际的加工坐标点，P 点在机械坐标系中的坐标为绝对坐标 (MX, MY, MZ)，而在工件坐标系中的坐标为 (WX, WY, WZ)，P 点在不同的坐标系下具有不同的坐标，其中的几何关系为：

$$\begin{cases} MX = OX + WX \\ MY = OY + WY \\ MZ = OZ + WZ \end{cases} \quad (5-1)$$

## 5.2 雕刻机加工程序

雕刻机程序的编写是以工件坐标系为基础，根据加工图样要求的尺寸，可以采用绝对编程、增量编程或者两者混和编程的方式。这与一般数控机床相同。但雕刻机所用程序通常无需考虑循环操作功能。常用的编程语言有两种语言格式：ISO 格式的 GM 代码编程语言和 HPGL 编程语言。

### 5.2.1 ISO 格式 GM 代码编程语言

ISO 代码为国际标准，目前我国也以此作为国家标准。本系统采用 ISO 格式 GM 代码编写的雕刻机程序有若干“程序段”，每个程序段由字组成。字是用来表示某一功能的一组代码符号，可以为英文字母、数字和一些特殊文字。如 Y100 用来表示 Y 向加工尺寸为 100mm。每个字都由字母开头，如 Y100 中的 Y，这种开头字母称为地址。采用 ISO 格式 GM 代码编写的程序中的地址字符意义如表 5.1 所示。

表 5.1 地址字符表

文字地址	功能	数据范围
%	程序开头和结束	
F	进给速度	0—29,999
G	准备功能	0—99
I	圆心的 X 坐标	0—±9,999.999
J	圆心的 Y 坐标	0—±9,999.999
K	圆心的 Z 坐标	0—±9,999.999
M	辅助功能	0—99
N	语句号	1—99,999
S	主轴转速	0—24,000
X	X 坐标	0—±9,999.999
Y	Y 坐标	0—±9,999.999
Z	Z 坐标	0—±9,999.999

雕刻机系统中常使用到的是 G 准备功能字和 M 辅助功能字。准备功能字是使雕刻机执行某种操作的控制字，用 G 和两位数字表示。雕刻机系统中使用的 G 代码被分成 5 组，同组中的 G 代码不能同时出现在一个语句中。具体的 G 功能代码及其功能如表 5.2 所示。

由表 5.2 中可知，雕刻机除了可以使用 G92 建立工件坐标系外，还可以使用 G54—G59 中的任意指令设定坐标系。G54—G59 给出的是工件坐标系与机床坐标系偏差值。所以雕刻机在具体执行的时候只是将当前工件坐标系偏移一个分量。此功能与数



控铣床中的相应指令作用相同。

表 5.2 G 功能代码及其功能查询表

G 码	功能
G00	直线插补, 直角坐标, 快速移动
G01	直线插补, 直角坐标, 受进给速度 F 控制
G02	顺时针圆弧插补, 直角坐标, 受进给速度 F 控制
G03	逆时针圆弧插补, 直角坐标, 受进给速度 F 控制
G17	XY 平面设定, 角度基准为 X 轴
G18	ZX 平面设定, 角度基准为 Z 轴
G19	YZ 平面设定, 角度基准为 Y 轴
G92	用当前刀尖位置作程序坐标原点
G54	选用设定的加工坐标系 0, 系统缺省的工件坐标系
G55	选用设定的加工坐标系 1
G56	选用设定的加工坐标系 2
G57	选用设定的加工坐标系 3
G58	选用设定的加工坐标系 4
G59	选用设定的加工坐标系 5
G70	尺寸单位为英寸
G71	尺寸单位为毫米
G90	绝对尺寸
G91	相对尺寸

表 5.3 M 功能代码及其功能查询表

M	功能	Block 开头起作用	Block 结尾起作用
M00	程序停止运行 主轴停 冷却关	No	Yes
M02	程序停止运行 主轴停 冷却关 回到程序开头第一个 Block	No	Yes
M03	主轴顺时针转动	Yes	No
M04	主轴反时针转动	Yes	No
M05	主轴停	Yes	No
M08	冷却开	Yes	No
M09	冷却关	No	Yes
M30	同 M02	No	Yes

M 辅助功能字用来控制机床执行一些开关性质的指令。辅助功能码 M 的作用时机不一致, 有的在语句的开始就要解释, 有的在语句结束时解释。本系统中的 M 辅助功能字只具备单一功能, 在别的数控系统中 M 指令可以具有复合功能。雕刻机系统中具

体使用的 M 辅助功能字及功能如表 5.3 所示。

雕刻机程序的编制非常简单，只需合理的利用前面介绍的 G 准备功能字和 M 辅助功能字以及其它加工信息就可以完成程序的编写。一条完整的 GM 程序指令称为一个 Block。其中最多可包含下列元素，各元素之间可以有空格，也可以没有空格。雕刻机具体的程序结构以%开始一个程序，后面为一系列的定位语句，最后以%结束。每个定位语句前可有以 N 打头的语句号。

在具体的 G 代码程序中，为了简化程序，节省存储空间，普遍使用“模态”指令。所谓“模态”指令是指程序后面的指令如果和前面指令相同，则后面的指令可以省略不写。如上面例子中 N5、N6 语句没有 G 代码，只有坐标指令，它就默认 N4 的代码 G01。在前述 G 代码表中，除了 G04、G92 之外，其余 G 码都是具有模态特性的指令。另外 I、J、K 也有模态特性，如果后一条圆弧指令的 I、J、K 值和前一条圆弧指令的一样，则可以省略。

### 5.2.2 HPGL 代码编程语言

HPGL 是惠普图形语言 (Hewlett-Packard Graphics Language) 的缩写，是由惠普公司制定的一种矢量文件格式的绘图指令，是一种被广泛使用的电脑绘图语言，不受限于操作系统。在本系统中，绘图指令指的是电脑控制雕刻机工作的命令，它告诉雕刻机的刻刀应该如何如何在雕刻对象上运动，最终准确地打印出文字与图像。

本系统中具体使用的 HPGL 代码指令及相应的格式如下：

- 1、IN; ——初始化。
- 2、ZZ1; ——表示三维。  
ZZ0; ----表示二维。
- 3、SP1; ----从刀具库 1-8 中选择刀具 1。  
SP0; ----刀具复位。
- 4、PA; ——绝对移动，其后的数据是目标点的绝对坐标值。  
PA ;  
PA X, Y;  
PA X, Y, Z;
- 5、PR; ----相对移动，其后的数据是目标点对于起点的增量值。  
PR ;  
PR X, Y;

PR X, Y, Z;

6、PU; ----即“pen up”, 抬刀, 抬刀时作快速移动。

PU ;

PU X, Y;

PU X, Y, Z;

7、PD; ----即“pen down”落刀, 落刀走 F 速度。

PD ;

PD X, Y;

PD X, Y, Z;

8、AA; ----绝对坐标走圆弧。AR; ----相对坐标走圆弧。

AA X, Y,  $\alpha$ ; 此处 X、Y 表示圆弧中心坐标,  $\alpha$  表示圆弧的角度, 单位是度, 如是负值则为顺时针, 相反正值则为逆时针。

AR X, Y,  $\alpha$ ; 此处 X、Y 表示圆弧中心坐标相对起点坐标的增量,  $\alpha$  表示圆弧的角度, 单位是度, 同前负值为顺时针, 正值为逆时针。

9、SF; ----走刀速度;

SF[n1], [n2];

n1, x、y 进给; n2, 主轴转速。

比较 ISO 格式代码和 HPGL 代码可知, HPGL 代码相对比较简单, 为大多数雕刻机自动编程软件所支持, 所以在雕刻机控制系统中 HPGL 代码使用比较广泛。

### 5.3 本章小节

本章主要介绍了雕刻机程序编制的相关知识, 从而确保编制的加工程序能够使雕刻机的功能得到合理的应用和充分的发挥, 使数控雕刻机安全可靠及高效的工作。

## 第六章 系统软件设计

### 6.1 系统软件的总体结构

雕刻机数控系统软件设计包括两大部分：一是 DSP 主控制板的控制软件，主要完成指令接受、编译、程序管理、插补运算、输入输出端口操作等一系列任务，是整个系统实现各功能的主控软件；二是人机界面的软件，其中包括 PC 机的加工程序下载操作界面和基于单片机的人机界面的控制软件。PC 机软件相对比较简单，只是用来完成加工代码向 DSP 主控板的下载任务；而基于单片机的人机界面软件要完成键盘扫描、液晶显示以及和主控制板之间的串口通信任务。

根据第二章提出的系统控制功能要求，本系统的主控制软件流程框架如图 6.1 所示。

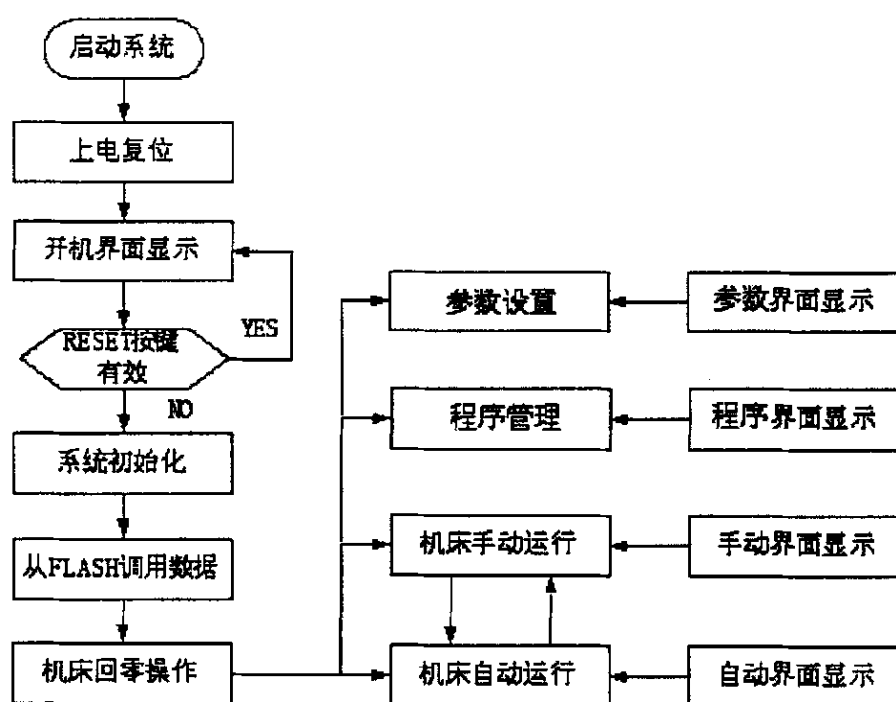


图 6.1 系统软件总体流程框图

系统上电复位后进入初始化阶段，配置系统各硬件单元的功能寄存器，从而确保系统正常运行。初始化系统后从 FLASH 内读入最近一次关机前的机床参数和加工参数，随后由操作人员根据实际需要更改或保留相应的机床参数。到此为止，机床已经

进入加工等待状态。如果要开始加工则必须要调用加工程序代码，系统提供两种调用加工程序的方式：直接调用已经存储在 FLASH 内的加工程序，或从 PC 机下载新的加工程序。启动自动加工后机床进入加工环节。此外，在机床关机前还需将当前相应的机床参数和加工参数保存到 FLASH 中，便于下次启动时重复设置。上述整个过程是均通过主控制板和人机界面加以实现。

本系统的软件开发采用汇编语言和 C 语言混和编程。汇编语言可以直接管理硬件资源，是一门高效的编程语言，对雕刻机数控系统，高效尤为重要。但是使用汇编语言编写的程序存在可读性差、移植困难以及不易维护的弱点。而 C 语言的使用很大程度上弥补了汇编语言存在的不足。为此，在本系统软件的设计中还采用了 C 语言编程，用以构造整个软件的主体框架，完成实时性要求不高的管理软件设计。实际开发中，除插补运算和速度控制等实时性要求很高的程序使用了汇编语言外，其它程序都是采用 C 语言编制。这种混和编程方式不仅能较好地满足系统的实时性要求，还使得软件流程非常清晰，提高了编程效率。

下面分别就本系统的主控制板程序设计、人机界面程序设计及采用的软件抗干扰方法等方面进行阐述。

## 6.2 DSP 主控板程序设计

DSP 主控制板是整个数控系统的控制核心，其软件设计也是整个系统软件设计的关键。根据系统的具体功能，主控软件设计可划分为五大部分：机床自动回零操作的软件设计、手动运动的软件设计、自动加工的软件设计、程序的管理和编译以及参数设置的软件设计。

### 6.2.1 机床自动回零的软件设计

机床回零过程其实就是机床的 RESET 过程，机床回零操作具有两个作用：一是建立准确的机床坐标系；另一个是消除机床由于漂移、变形而产生的误差。因为机床在工作一段时间以后，工作台会产生一定的漂移，导致加工存在漂移误差。执行一次回零操作，就可以弥补漂移产生的误差，使机床的工作台回到准确位置。

具体回零过程是控制机床工作平台向机床零点位置移动，直到获得零点位置的限位开关信号，一旦获得限位信号就控制运动平台减速运行直到停止。为提高回零的精度，还需控制电机低速反向运动至机床零点限位开关信号消失，则该位置即为该运动坐标的机床零点。回零操作须按照以下次序回零：首先 Z 轴的回零，再执行 XY 轴联动回零。其中，Z 轴回零的具体软件流程如图 6.2 所示，XY 轴回零点操作的相应软件流程如图 6.3 所示。

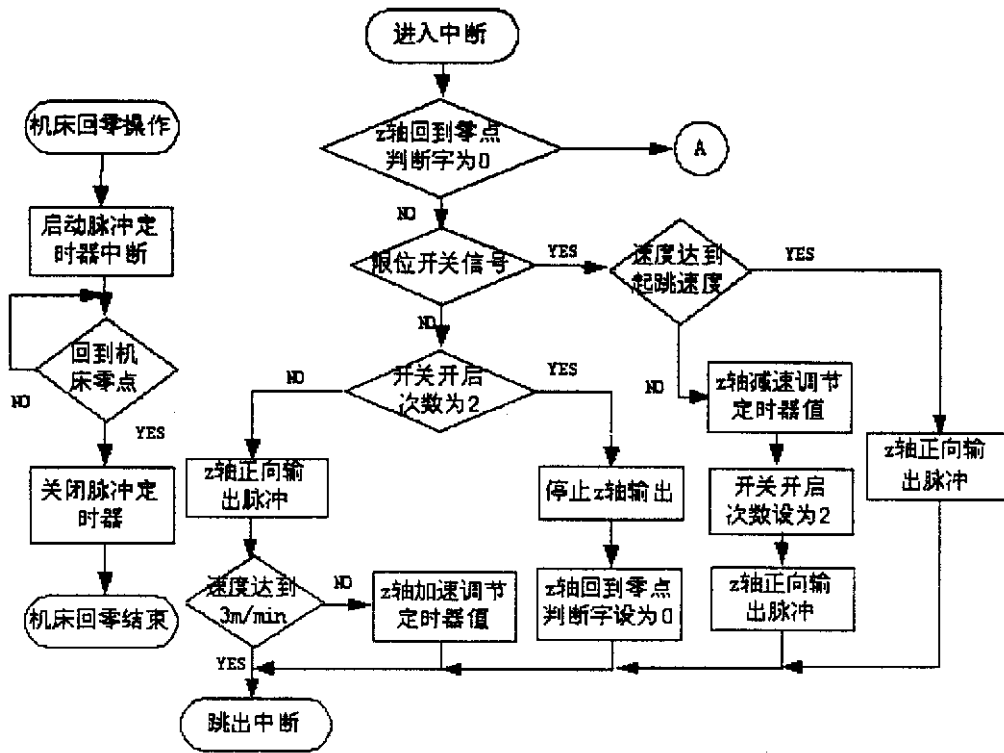


图 6.2 机床 Z 轴回零软件流程

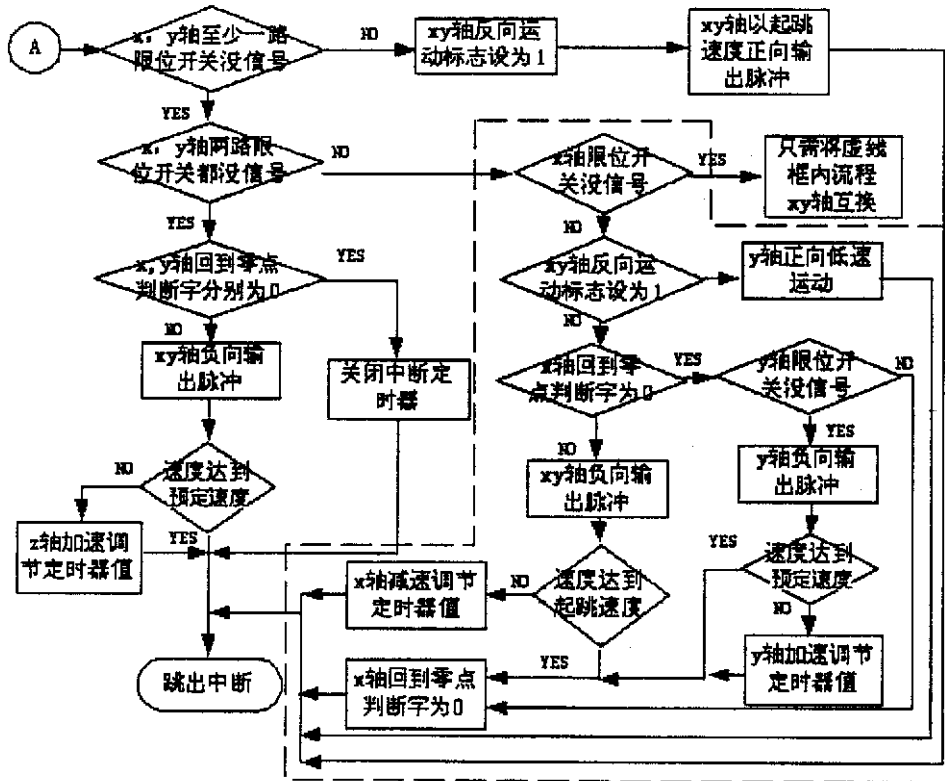


图 6.3 机床 XY 轴回零软件流程

图 6.3 详细示出了 X 轴获得限位开关信号的具体操作流程图。如果先获得 Y 轴

限位开关信号，只需将图 6.3 虚线框中的 X、Y 轴互换即可。

### 6.2.2 手动运动的软件设计

本系统的手动功能包括机床点动或连续运动，主要用于加工原点的设定等操作。

机床能够正常加工的前提条件是有准确的坐标系，而对雕刻机而言，准确的坐标系除准确的机床坐标系外，还需准确的工件坐标系。工件坐标系主要用来确定机床加工的工作原点，即加工程序编制的基准点。可见，在加工开始之前设立准确的加工原点是必不可少的。

工件坐标系的设定可通过机床点动或连续运动完成。点动步长可以在 0.01ms、0.05 ms、0.1 ms、1 ms 之间进行任意选择，具体值由人机界面设置的参数决定。连续运动时，按下 +X、+Y、+Z、-X、-Y、-Z 键后控制各轴沿相应方向运动直至按键释放。无论点动还是连续运动，实现的软件流程如图 6.4 所示。

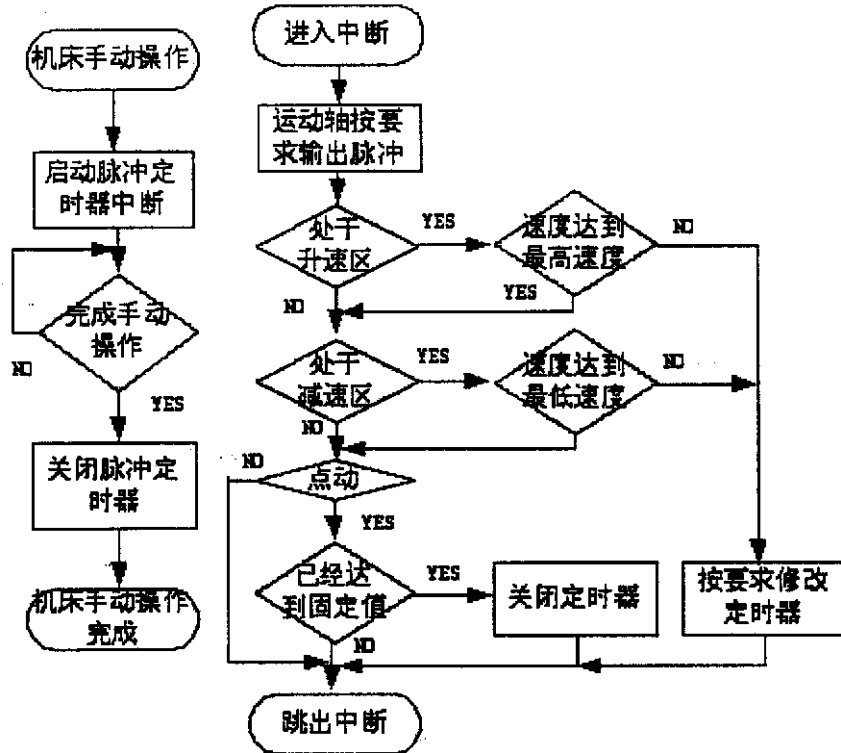


图 6.4 手动操作软件流程

由图 6.4 可知，点动与连续运动唯一的区别在于，是否存在确定的停机位置，除此以外连续运动与点动控制完全一样，都有一个完整的升速与减速过程。具体的升速步数和减速步数按照以下方式确定。

在机床处于点动状态下，首先判断需要运动的距离是否大于一个完整的升降速过程所需的距离，如果大于则按点动的最高速度计算升（减）速步数；否则在需要运动

的距离内无法实现一个完整的升降速过程，可按总点动的半程确定升（减）速步数。

当机床执行连续运动时，按键按下使机床处于升速过程，当单片机扫描到按键释放的状态后机床自动进入减速状态直到停止。在升速过程中，如果按键按下的时间大于升速到手动运行最高速所需的时间，则连续运动有恒速运动过程，否则只有升速与降速过程。

### 6.2.3 机床自动加工的软件设计

机床自动加工要完成加工数据处理、插补运算、各加工状态控制以及电机控制等一系列操作。这部分软件的设计是 DSP 主控板所有软件设计中的核心部分，其设计的优劣直接影响整个系统的使用性能。

要设计一个满意的自动加工功能模块，意味着设计一个尽可能好的无间隙加工模块。要实现无间隙加工必须要做到以下两点：一是单段加工轨迹的插补进给运动不能够有间断，这是任何数控系统存在的前提调节，否则会影响零件的加工质量和加工效率。本系统中通过 DSP 的高速性可保证这一点；二是相邻轨迹过渡时候不能够产生间隙，本系统通过预处理程序代码来保证。

#### 6.2.3.1 单段轨迹无间隙运动

本系统在直线运动空行程状态下，要求能够达到 15m/min (100K HZ) 的最高速度。这样要保证系统在 10us 内完成一次直线插补运算。由于 TMS320F2812 可以工作在 150MIPS 的状态下，且大多数指令是单指令周期，在 10us 内完全可以完成 1000 条指令的运算。本系统通过对汇编程序严格控制指令代码，使得单段加工轨迹的插补进给运动能够做到无间隙加工。该部分的控制软件通过 CPU Timer0 中断实现，中断软件流程如图 6.5 所示。

第一步，加工程序预处理。对于刚开始加工或是调用了新的加工程序段，先调用加工预处理函数，完成对插补过程中所需变量的赋值操作。进入加工预处理函数后首先判断本段加工轨迹中是否包含段前或段末指令，然后继续完成插补过程中所需变量的赋值操作。

第二步，速度控制。对于加工过程的升降速控制，可通过修改 CPU Timer0 的定时值来控制具体的加工速度。

第三步，插补输出。在中断服务程序中完成插补运算，并根据机床当前状态判断是否可以输出，以及按何种方式输出，控制机床运动。

最后判断是否本程序段结束，如果已经结束则还需要判断是否有段末处理指令，



并且执行相应的操作。

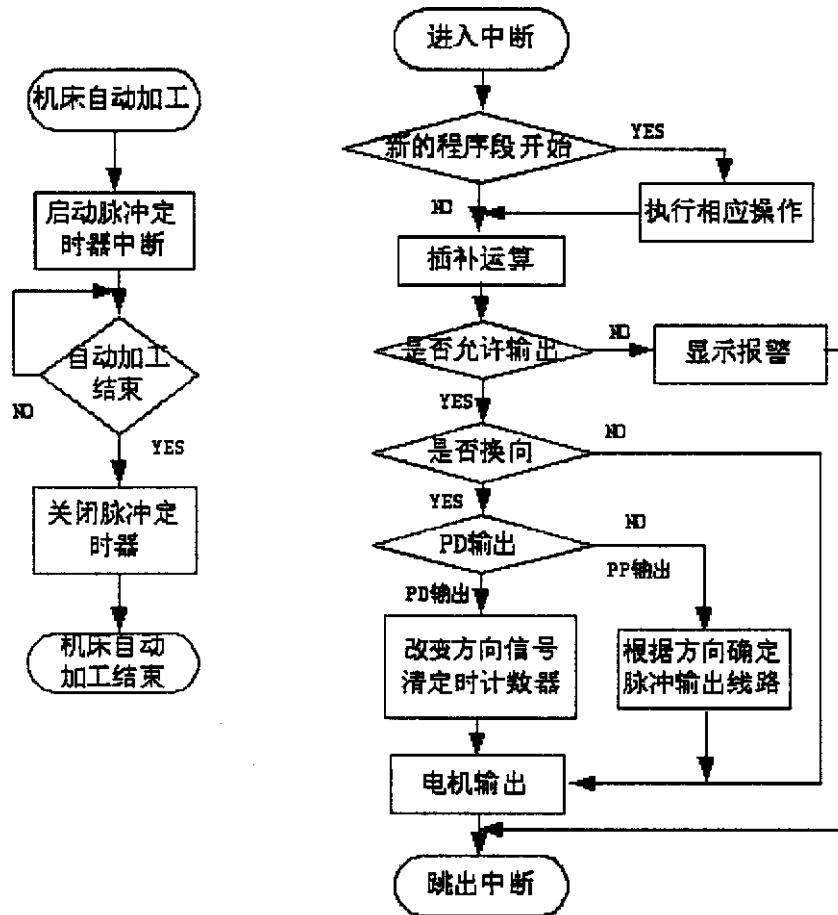


图 6.5 PC 机软件中断流程

### 6.2.3.2 相邻轨迹之间无间隙过渡

为保证相邻程序段之间的无间隙过渡，避免在调用新程序段时因预处理时间较长，造成段间过渡的短暂停顿，本系统采用流水工作方式，开辟循环 RAM 缓冲区，保证在本段程序加工结束前下段程序的预处理已准备好，从而确保相邻轨迹的无间隙过渡加工。具体的循环 RAM 的设计示意图如图 6.6 所示。

如图 6.6 所示控制方法，具体实现相邻轨迹无间隙加工的操作顺序如下：在进入加工状态之前，首先将 FLASH 内的加工程序经译码后调至外部循环 RAM 中，此外部循环 RAM 理论上越大越好，用来解决 FLASH 进行读写费时的问题；然后将外部 RAM 内的数据经过速度处理后调至内部循环 RAM，此循环 RAM 区域因为实时性高，所以无需很大空间。此处为了解释清楚，无论内部或外部循环 RAM 的空间都用 8 个 BLOCK 代替。

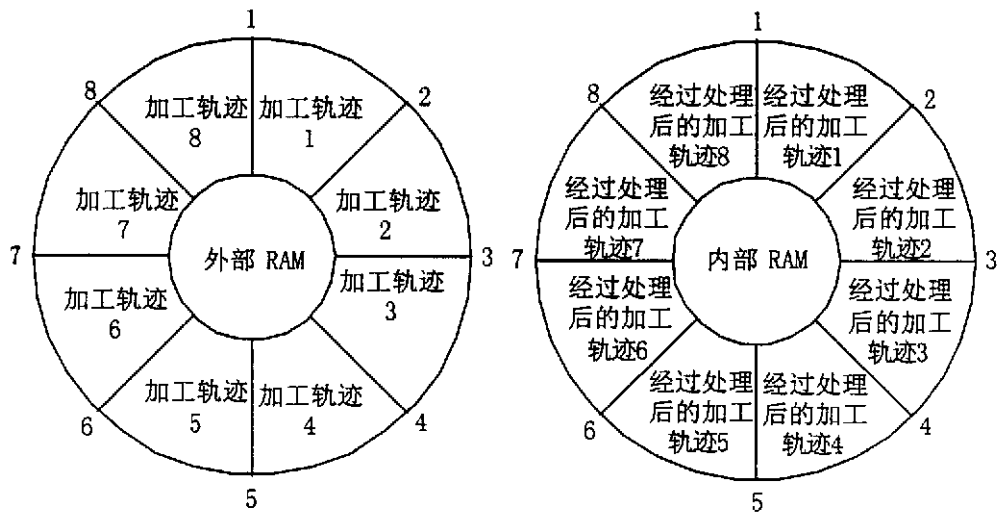


图 6.6 循环 RAM 的设计示意流程

对循环 RAM 具体操作如下：首先给循环 RAM 定义一个头指针和尾指针，在进行循环操作的时候头指针用来装入数据，而尾指针代表输出数据。系统刚开始的时候头尾指针在同一个位置，经过装填，尾指针与头指针相差 8 个 BLOCK 区域，此刻头尾指针仍然在同一个位置。当输出一个数据后尾指针前进一步，此刻打破头尾指针相等的平衡关系，为了重新建立新的平衡，系统将从外部 RAM 读入数据，直到建立新的平衡，如此循环直到加工结束。

经过样机调试证实本系统所采用的无间隙控制策略能够达到很好的控制效果

#### 6.2.4 机床程序管理和编译

主控制板作为系统的控制核心，必须具备管理加工程序的能力，具体包括加工程序的下载、存放、调用、删除等操作。本系统的设计要求最多能够同时保存 8 个 1M 字节的加工程序，为此系统扩展了 8M 外部 FLASH 用于保存加工程序。所以，对加工程序的管理其实就是对外部 FLASH 的管理。

当进入程序管理状态后，系统会针对不同的按键执行不同的操作。具体功能流程图如图 6.7 所示。

对于加工程序下载，须在下载程序前对系统中可用的空闲 FLASH 存储空间进行计算，并与 PC 机将要发送的程序量进行比较，如果要下载的程序量超过现有的空闲存储空间，必须通知 PC 机中断当前的程序下载操作，反之让 PC 机正常下载程序直至结束。

加工程序调用，即当系统进入加工状态后，首先要从 FLASH 内调用加工程序。在调用过程中必须将程序代码进行译码，再按一定格式存放到外部 RAM 中，此处的格式是 DSP 主控制板在插补时使用的自定义专用数据格式。对加工程序译码的目的是获

得规范的数据格式从而提高插补运算速度，节省系统资源和实时处理时间。

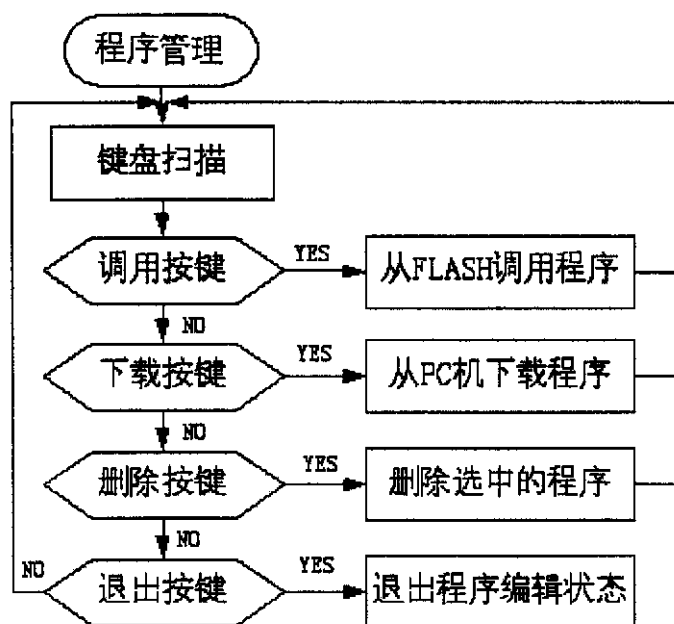


图 6.7 程序管理流程图

### 6.2.5 机床参数设置

与通用数控系统类似，雕刻机数控系统也可以通过功能参数和运动参数的设置来满足不同的雕刻机和加工控制需求。本控制系统中的系统参数包括机床运动参数、主控制板与人机界面之间的串口通信参数、机床本体参数等参数。当操作人员每次完成以上参数的更改或设置后，系统会自动将这些参数保存到外部 FLASH 内。从而确保系统断电重新上电工作后，可以自动将各个工作参数恢复至最新修改值。

#### 6.2.5.1 机床运动参数

机床运动参数包括 X、Y、Z 轴各自空行程运动的最大速度、加工速度以及步进电机的起跳速度、加减速速度等方面的参数。这些参数直接决定着系统的控制性能，如电机的加减速及起跳速度限制了数控系统变速运动的时间常数；空行程运动的最大速度是各轴运动的极限速度，如加工中编程速度超过该设定值，则只能按设定的最高速度进行控制，以确保雕刻机电控系统的安全性。

#### 6.2.5.2 主块板与人机界面串口通信参数

操作人员可以根据实际的加工环境以及加工程序的大小选择不同的串口通信参数。在数据量不大的场合，使用较低的通信波特率提高系统数据传输的可靠性；同时

要注意数据线的长度不应太长，否则会降低数据传输的正确率。

### 6.2.5.3 机床本体参数

机床本体参数由雕刻机生产厂家设定。它给出了目前本系统所控制的雕刻机的基本机床参数，具体包括 X、Y、Z 轴各自的脉冲当量、运动方向、工作台面的尺寸、电机控制信号的输入方式和主轴最大转速等参数。其中，步进电机的脉冲当量直接决定机床所能达到的位置控制精度；电机控制信号输入有两种方式可选：脉冲方向（d-p）和正反向脉冲（p-p）。

## 6.3 人机界面程序设计

人机界面软件设计主要包括两部分：一是基于通用 PC 的数控程序下载人机界面的软件设计；二是基于单片机的加工操作人机界面软件设计。下面分别就这两个方面分别介绍所用软件的设计流程。

### 6.3.1 PC 机程序下载通讯界面设计

PC 机软件只是为用户提供一个直观的程序下载窗口，整个人机界面采用 Visual Basic6.0 编写，用来完成 PC 机与 DSP 主控制板之间的串口通信。为建立通信通道，PC 机与主控板建立通信通道之前必须按照一定的协议进行握手操作。

具体通讯过程是：由主控制板首先发送握手特征字，代表主控制板已经完成设置，可以进行通信，并进入等待状态；如果在给定的时间内未接受到 PC 机的应答，重发并等待三次，直到接受到 PC 机返回握手特征字，代表 PC 机已经处于通信状态，完成与 PC 机间通讯通道的建立。如果主控制板连续三次发送握手信号都未获应答信号，则系统自动报警，提示操作员检查串口。在建立通讯通道后，PC 机向主控制板批量发送加工程序至结束。具体的通讯数据帧结构如图 6.8 所示，PC 机的软件设计流程如图 6.9 所示，PC 机的下载界面如图 6.10 所示。

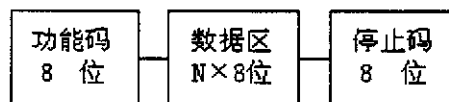


图 6.8 PC 机与主控制板通信数据结构图

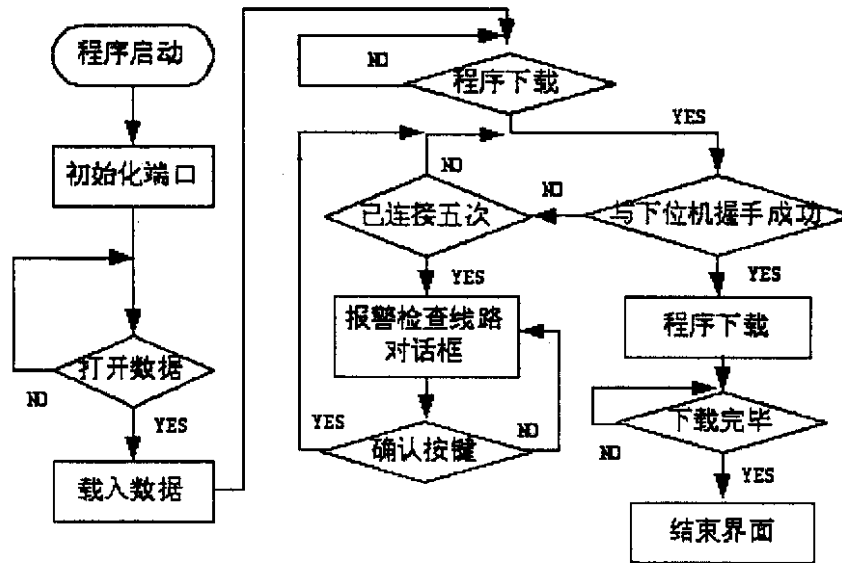


图 6.9 PC 机软件流程

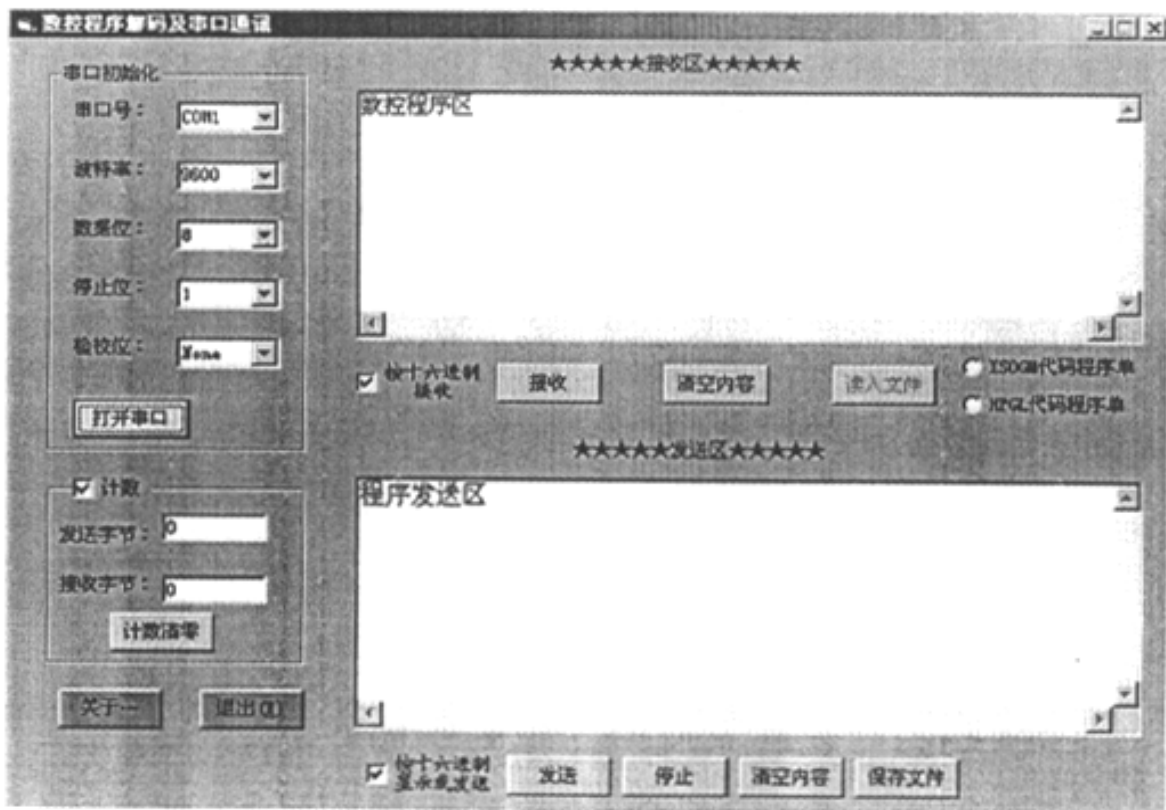


图 6.10 PC 机的人机界面

### 6.3.2 基于单片机的操作人机界面程序设计

基于单片机的系统操作人机界面的任务是，为整个系统提供了一个良好的操作人机界面。软件主要包括键盘扫描程序（限于篇幅此处不做解释），液晶屏显示界面设计。

在进行液晶屏操作时显示的数据必须由主控制板决定，如果采用普通的全屏刷新的显示方式，则存在数据量很大的问题，使得系统的实时性。考虑到液晶显示的响应时间大于等于 10ms，如果显示过快，显示器响应速度跟不上，同时由于人眼的视觉停留效应，两次显示刷新的时间间隔小于 80ms 时人眼无法察觉。因此，制定了本系统的显示策略，即将显示任务等分显示，利用定时器 10ms 传送一次数据，一屏数据最多分成 8 个显示区域。具体方法是，给每个界面预先定义一个界面号，每个界面中的每个显示区域定义一个功能号，而各功能中与机床运动有关的数据来自主控制板。这样主控制板只需发送界面号、功能号以及少许有用数据，大大的节省了系统的开支。单片机则根据不同的界面号显示界面，根据功能号和随后的功能数据，显示当前界面下相应区域的数据。

#### 6.3.2.1 开机界面设计

系统上电开机后，显示一个友好的开机欢迎界面，如图 6.11 所示。

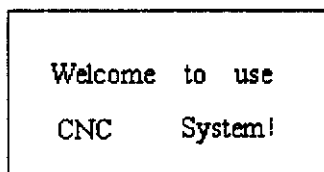


图 6.11 系统开机界面图

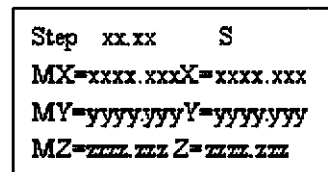


图 6.12 系统手动界面

在开机界面下按“manu”进入手动加工界面；按“auto”进入自动加工界面。

#### 6.3.2.2 手动加工界面设计

进入手动加工状态显示的界面如图 6.12 所示。图中，Step 后显示的是每次点动的步长，可在 0.01、0.1、0.5、1 以及任意定长之间进行切换。X、Y、Z 后面显示的是工作坐标；MX、MY、MZ 后面显示的是机械坐标。显示手动加工使用的具体功能号及数据格式如表 6.1 所示。

表 6.1 手动界面功能数据表

数据长度	功能号	显示区域	备注
0x3	0x1	MX 之后	长度小于 3 个 Byte 的数据用零补充至 3 个 Byte
0x3	0x2	MY 之后	
0x3	0x3	MZ 之后	
0x3	0x4	X 之后	
0x3	0x5	Y 之后	
0x3	0x6	Z 之后	
0x2	0x8	S 之后	
0x1	0x7	Step 后	Step 后显示的内容有具体数据决定
0x1	0x9	Steps 的位置	此刻显示具体超行程的坐标轴，用于报警
0x1	0xa	Steps 的位置	此刻显示保存的具体坐标轴，用于坐标保存

### 6.3.2.3 自动加工界面设计

自动加工状态显示的界面如图 6.13 所示。本界面包括主显示界面 (a 图) 和辅显示界面 (b 图)，可通过“确认”键随时切换。其中，(X、Y、Z) 为工作坐标；(MX、MY、MZ) 为机械坐标；(DX、DY、DZ) 为本段的加工剩余坐标；F 为当前实际进给速度或状态；S 为当前主轴实际转速；T 为本程序已加工时间（暂停不计）。

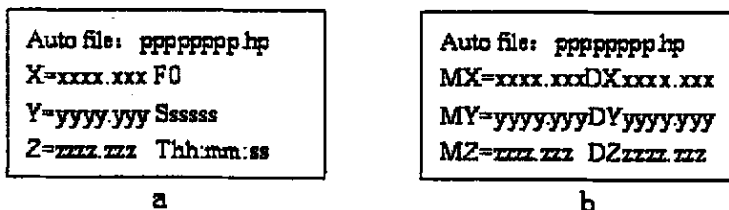


图 6.13 系统自动加工界面

## 6.4 软件抗干扰措施

前面第四章已经介绍关于了抗干扰技术使用的重要性，同时介绍了本系统在硬件方面采取的相关抗干扰措施，此处不再赘述。为进一步提高系统的可靠性，仅仅有硬件抗干扰措施在很多场合下是不够的，本系统还采用了必要的软件抗干扰措施，具体有以下几种方式：

(1) 在软件设计过程中采用模块化设计方式，将一个系统划分为若干个独立的功能模块。在进行模块编程的时候尽量不采用跳转指令。通过这种设计方法使得编程思路清晰，编写的程序可读性高、维护方便。

(2) 编写软件的时候采用自顶向下、逐步细化的方法。从开始设计就要有一条明确的设计思路。避免了将较多的大量时间纠缠在底层问题上。

(3) 对于开关量输入要进行软件滤波，保证输入的数据稳定可靠，降低因随机干扰带来的误差。

(4) 在程序段的空闲存储器里填入空操作指令，并且在末尾放入一条无条件转移指令，使程序跳到出错处理子程序。这样当系统受到干扰时，能够快速响应，及时补救，防治出现意外。

## 6.5 本章小结

针对雕刻机系统的加工特点，系统软件部分完成的主要工作包括：机床自动回零操作的软件设计、手动和自动加工的软件设计、程序的管理以及参数设置和人机界面等的软件设计等。以上工作都围绕一个目的，就是最大限度地利用 TMS320F2812 片上资源，结合普通单片机实现一款高性价比的雕刻机数控系统。通过与硬件的联调验证，本系统的软件运行可靠稳定，具有实用价值。



## 第七章 总结与展望

雕刻机数控系统是一种专用数控系统，侧重实现加工的高速性和性价比。研究开发高性价比的雕刻机数控系统，是我国雕刻行业进一步发展的前提保证。

针对数控雕刻加工的特殊要求，本文对基于高速 DSP 的雕刻数控系统研发中的若干关键技术进行了研究，并成功开发出雕刻数控系统样机。

### 7.1 总结

本文针对计算机雕刻数控系统进行了研究。分析了当代雕刻数控系统发展的趋势，围绕着雕刻数控系统的运动控制技术，从运动控制的体系结构、高速插补、速度控制已经相邻轮廓曲线无间隙加工等方面进行了设计和研究。本文主要工作如下：

(1) 分析比较了现有雕刻数控系统的不足，结合高速数控的技术发展，提出了以高速 DSP 为控制核心，采用普通单片机完成人机界面的主从式控制结构设计方案，可以较好的兼顾系统的性价比和快速性。

(2) 在运动控制算法上，应用比较积分法插补，结合良好的进给升降速控制算法，实现了高速雕刻加工相邻线段之间的平滑过渡，满足了雕刻加工对速度及加工平稳性的要求。

(3) 围绕着提高系统的性价比和快速性，采用 TMS320F2812 型 32 位定点 DSP 作为控制核心，辅以 CPLD 扩展外围 I/O 和存储器等，与基于单片机实现的人机界面配合，完成了雕刻数控系统的硬件电路设计，较好地兼顾了系统的控制性能与制造成本，也提高了系统设计灵活性和工作可靠性。调试表明，系统硬件运行可靠、稳定。

(4) 采用汇编、C 语言混合编程完成了本系统的软件设计，用汇编语言完成实时性控制任务，C 语言编程构造整个软件的主体框架、实现非实时性任务，既提高了系统软件的编程效率和可维护性，又保证了系统良好的实时性。

(5) 最后，成功通过了样机系统的软硬件联调。联调结果表明，样机系统的功能和性能达到了预期设计要求。

## 7.2 研究展望

雕刻机数控系统是一门综合技术，需要先进的计算机软硬件技术支持。随着计算机技术、网络技术和微电子技术的不断发展，雕刻数控系统要不断的吸收新的科技成果。本系统在以下几个方面有待提高和完善。

(1) 本系统没有涉及位置反馈，目前只是开环控制系统，没有形成闭环控制。为进一步提高系统的控制精度，后续工作可以对此进行完善。

(2) 目前，本系统只提供了直线和圆弧插补功能，为提高系统的运动控制能力，可对其它插补方式进行研究，如高阶插补曲线和空间曲线插补等。

(3) 本系统采用的是单机操作方式，随着网络技术的日益普及，雕刻机数控系统必将向网络化、集成化和集散控制的方向发展。

(4) 目前虽然针对雕刻机数控系统的安全性及可靠性问题考虑了不少，但随着数控系统的网络化和智能化，病毒也会随之进入控制系统，所以雕刻机数控系统还必须在这一方面采取必要的防范措施。

## 参考文献

- [1] 杨有君. 数字控制技术与数控机床. 机械工业出版社 1999
- [2] 张曙等. 机床数控技术的发展现状与趋势. 组合机床与自动化加工技术. 1993(1): 1-4
- [3] 王永章. 机床的数控技术. 哈尔滨工业大学出版社, 1995
- [4] 李佳特. 数控技术的现状. 发展趋势. WMEM, 2001(1): 34-37
- [5] 张曙等. 机床数控技术的发展现状与趋势. 组合机床与自动化加工技术. 1993(1): 1-4
- [6] 叶伯生等. 计算机数控系统原理、编程与操作. 华中理工大学出版社 1998
- [7] 任玉田, 焦振学, 王宏甫. 机床计算机数控技术. 北京理工大学出版社 1996
- [8] TMS320C28X DSP CPU and Instruction Set Reference Guide. TI. 2003
- [9] TMS320F28X DSP Peripherals Reference Guide. TI. 2003
- [10] 刘和平, 严利平, 张学锋, 卓清锋. TMS320LF240x DSP 结构、原理及应用. 北京航空航天大学出版社. 2002
- [11] 刘和平, 王维俊, 江渝, 邓力. TMS320LF240x DSP C 语言开发应用. 北京航空航天大学出版社. 2003
- [12] 焦振学, 王宏甫. 机床计算机数控技术. 北方理工大学出版社, 1996
- [13] 白恩远, 王俊元, 孙爱国. 现代数控机床伺服及检测技术. 国防工业出版社. 2002
- [14] 郑堤, 唐可洪. 机电一体化设计基础. 机械工业出版社. 1997
- [15] 周正干, 李和平, 王美清, 杨民. 高速高精度加工的几种方法. 华北工学院学报. 2000(4)
- [16] Todd J. Schuett, A Recipe for Successful High Speed Milling, Creative Evolution, 2002
- [17] K. D. Oldknow, I. Yellowley. Design, implementation and validation of system for the dynamic reconfiguration of Open architecture machine tool controls. International Journal of Machine Tool & manufacture 41 (2001): 795-808
- [18] CHEN Ye. Development of control system for ultra-high speed CNC machine tools. Manufacturing and Technology & Machine Tool. 2000. 50(5): 12-14
- [19] A. Shima, Recent Development Activities of FANUC Product Development Laboratory, Japan SOC. Of process Enff. Vo. 24, No. 4, 1990: 224-251
- [20] 何耀雄, 周云飞, 周济. 可补偿任意结构数控机床几何误差的通用后置处理. 应用科学学报. 2002(3): 84-89
- [21] 郭新贵, 李从心. 高速切削的刀位路径规划与控制策略. 上海交通大学学报. 2002(4): 482-486
- [22] 钟庆, 李季, 黄树槐. 快速成形中的微线段连续高速高精度插补. 华中理工大学学报. 2000(3):

39-41

- [23]陈金成, 徐志明, 钟廷修. 机床延曲线高速加工时的运动学与动力学特性分析. 机械工程学报. 2001 (1) 31-34
- [24]Mi-Ching Tsai, Chung-Wei Cheng. A Real-Time Predictor-Corrector Interpolator for CNC Machining. Journal of Manufacturing Science And Engineering. 2003(August): 449 - 460
- [25]Intel StrataFlash® Memory (J3); 28F256J3, 28F128J3, 28F640J3, 28F320J3 (x8/x16) Datasheet. www.intel.com
- [26]Renton D, Elbestawi M A. High speed servo control of multi-axis tools. Int J Mach Tools Manufact. 2000. 40(1)539-559
- [27]马家晨, 孙玉德, 张颖. MCS-51 单片机原理及接口技术修订版. 哈尔滨工业大学出版社. 1998
- [28]沈红卫. 单片机应用系统设计实例与分析. 北京航空航天大学出版社. 2003
- [29]谭浩强. C 程序设计. 清华大学出版社. 1991
- [30]蒋璇, 臧春华. 数字系统设计与 PLD 应用技术. 电子工业出版社. 2001
- [31]赵世霞, 杨丰, 刘揭生. VHDL 与微机接口设计. 清华大学出版社. 2004
- [32]刘江晖, 熊清平. 基于 DSP 和 ISP 的运动控制板开发. 机电一体化. 2000(5):24-26
- [33]王润孝, 钱现生. 机床数控原理与系统. 西北工业大学出版社. 2000
- [34]朱晓春主编. 数控技术. 机械工业出版社. 2002
- [35]X. Yan, K. Shirase, M. Hirao, T. Yasui. Evaluation and Improvement of Productivity in High-Speed NC Machining. Journal of manufacturing Science and Engineering. 2000(August): 556 - 561
- [36]H. Liang, H. Hong, J. Svoboda. A Combined 3D Linear and Circular Interpolation Technique for Multi-Axis CNC Machining. Journal of manufacturing Science and Engineering. 2002(May): 305 - 312
- [37]Huang, J. T., Yang. D. C. H. Precision Command Generation for Computer Controlled Machines. Technology and Machine Development and Improvement. 1992:89-104
- [38]Yeh S S, Hsu P L. The speed-controlled interpolator for machine International Journal of Machine Tool & manufacture. 1999:471-488
- [39]佚名. 高性价比铣床数控系统. 南京理工大学硕士论文
- [40]刘洪泳. 四轴伺服运动控制卡的研制. 南京航空航天大学学位论文, 2004
- [41]罗睿梅. 高速数控系统的运动控制技术. 南京航空航天大学学位论文, 2003

## 致 谢

本论文的研究工作是在游有鹏教授的具体指导下完成的，回首两年多的求学生涯，作者的每一点进步与游老师的帮助和关心是分不开的。他严谨的治学态度和忘我的敬业精神将使我终身受益。由此，谨向导师游有鹏教授表示深深的敬意和最诚挚的感谢。

此外，在作者学习和课题完成期间，得到了赵东标教授、吴洪涛教授，周建江教授、杨明副教授、缪群华老师的诸多指导和帮助，在此一并表示感谢！

同时，在课题研究的过程中，作者还得到了陈学锋硕士，胡细东硕士以及其他师兄弟的热情帮助，借此机会表示衷心的感谢！

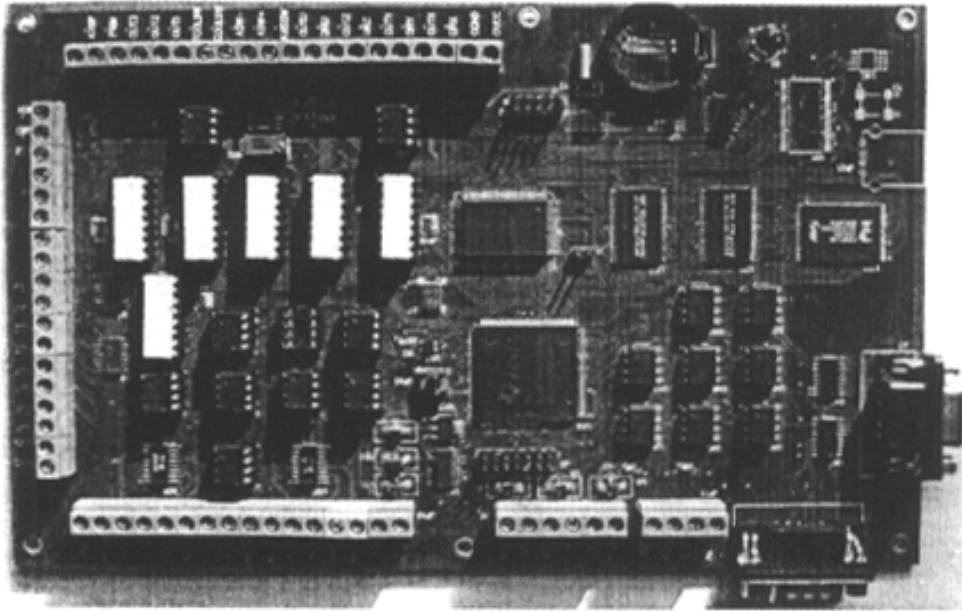
衷心感谢作者的父母对作者多年的养育之恩和辛勤培育之情，他们的无私支持帮助作者顺利的完成了学业。

最后，非常感谢作者其他家人和朋友给予作者的关心、支持和帮助！

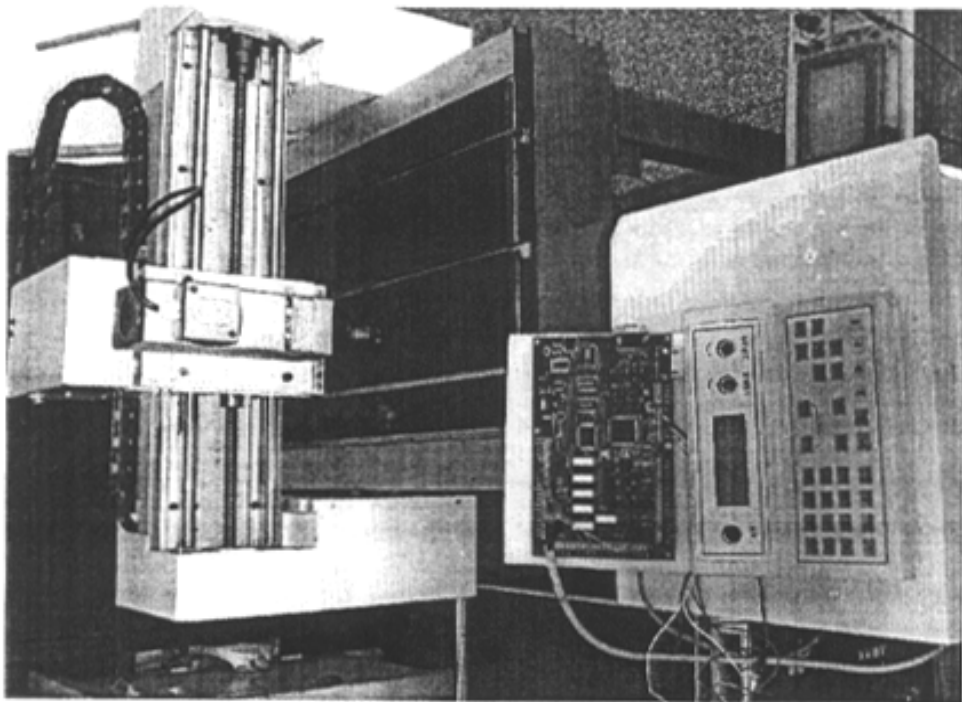
## 攻读硕士期间发表的论文

- [1] 唐才峰, 游有鹏, 胡细东. 玻璃拉丝机数字控制系统. 装备制造业与信息化高层论坛. 2004. 12.

## 附录



主控制板实物图



样机实物图