

上海交通大学

硕士学位论文

宽幅全彩喷绘机高精度喷绘技术的研究

姓名：殷晓光

申请学位级别：硕士

专业：机械电子工程

指导教师：曹其新

20030201

宽幅全彩喷绘机高精度喷绘技术的研究

摘 要

宽幅全彩喷绘机是广告，地理信息系统，高质量影像输出的关键性设备。这一领域有着广泛的市场潜力和巨大的经济效应。国外知名打印机公司都已推出自己的宽幅喷绘机产品。近几年对这一市场的争夺也越来越激烈。宽幅喷绘机是机电一体化的高科技产品。其本身就包括了计算机技术、数字控制技术、微粒爆发喷墨技术 (MicroBurst)、通讯接口技术和图形图像处理技术等当今最新的科研成果。是多种先进技术相互融合的集中体现。高精度喷绘技术对喷绘机达到高质量的喷绘效果来说是十分关键的。因此，对喷绘机的高精度喷绘技术进行研究有着重要的实用意义和探索价值。本文即是从以下几部分来介绍和分析高精度喷绘技术：喷绘机运动控制系统，打印头控制系统和两者之间的连接。主要内容包括：

1. 喷绘机控制系统分析：从喷绘机控制系统的软，硬件结构分析了喷绘机控制系统的功能，结构。各部分之间的关系和关键性技术；

2. 运动控制系统的研究：喷绘机运动控制直接影响到喷绘机的打印精度，速度。是喷绘机控制系统的主要任务之一。喷绘机运动控制系统是以 DSP 为核心来设计的。论文对 DSP 数字控制系统的结构，特点以及本系统的具体硬件结构进行了介绍。论文对运动控制系统的要求，实现方法和结果进行了详细讨论；

3. 打印头控制系统的研究：打印头是喷绘机的关键部件，它接收打印数据，并把打印数据转化为喷嘴的喷墨动作。对打印头的控制是喷绘机研制成败的关键所在，文中对打印头的工作过程，关键时序等进行了详细讨论。打印头控制系统是以 FPGA 为核心进行设计的数字控制系统。FPGA 的应用达到了打印头控制系统的两个关键要求：打印数据缓存，打印时序生成。打印头是按位置信息进行打印工作的。这种工作方式将减轻对运动控制系统的要求。文中对这一工作方式的

优点进行了说明。打印头的工作依赖于其控制时序的正确与否。文中对打印头的配置数据加载,正常打印操作两部分时序进行了详细的说明。并比较了实验得到的时序和技术文档中的时序。通过打印实验验证了生成时序的正确性。

文中以打印一个喷嘴宽度的直线和锯齿波两个图形来对高精度喷绘技术进行验证。实验的结果表明运动控制系统和打印头控制系统实施的正确性,这两项技术是实现高精度打印的基础。

关键词: 宽幅全彩喷绘机, DSP, FPGA, 时序

RESEARCH ON THE HIGH PRECISION PRINTING TECHNOLOGY OF PLOTTER

ABSTRACT

Digital plotter is the key equipment in advertisement, GIS (Geography Information System) and graphics printing. The plotter market is in large scale and full of potential. Many well-known printer companies in the world have their brand names in this field. The competition in the market share is increasing greatly in recent years. Digital plotter is a mechatronical and HI-TECH product. The key technology includes Computer Science and Technology, Digital Control Technology, MicroBurst Technology, Communication Interface Technology and Image Processing Technology. All of these are the newest achievements in science and technology. So we can find many applications of advanced technologies in a digital plotter. High precision printing technology is very important to the printing quality of plotter. The research work on this field is very useful and challenging. High precision printing technology includes motion control system , printhead control system and connection between them. The following is what the thesis is covering:

1. Digital plotter control system analysis: Analyse the structure, function and relation between different parts in both hardware and software of the control system and the key points in every part;.

2. Study on the motion control system: Motion control system of the digital plotter is very important to the precision and speed of printing. Also motion control system is an essential duty of plotter control system. The system is based on DSP. The structure and feature of DSP control system and the application here are discussed in detail. The requirements to motion control system and the implement method are the key points in this part;
3. Study on printhead control system: Printhead is a key part in plotter. Printhead receives the print data and does the printing. The success of the design of plotter depends on the printhead control system. The working process, important timing diagram are studied in detail and passed the test. Printhead control system is a digital system based on FPGA. FPGA makes the two requirements of printhead control system: printing data buffering and timing generation available here. Printhead takes encoder output signals as its working condition, which decreases the requirements to motion control. This will be mentioned in this thesis. Normal working of printhead needs the success of timing generation. The timing of configuration and printing are discussed in detail. Two tests : one-dot line printing test and saw printing test show the success of timing generation. Motion control and printhead control are the base of the whole control system.

KEY WORDS: Plotter , DSP , FPGA , timing

上海交通大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：殷晓光

日期：2003年2月28日

上海交通大学

学位论文版权使用授权书

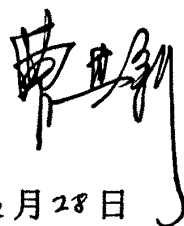
本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权上海交通大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☒，在 5 年解密后适用本授权书。
本学位论文属于
不保密 ☐。

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者签名：殷晓光

指导教师签名：



日期：2003年2月28日

日期：2003年2月28日

第一章 绪论

1.1 宽幅全彩喷绘机的发展现状和课题背景

近些年来,越来越多的打印精美的大幅广告出现在人们的视野当中。而打印出这些宽幅的广告画需要有专业的图形,图像输出设备——宽幅全彩喷绘机。宽幅全彩喷绘机的迅速发展也推动了相关应用行业的发展。对于提供高品质影像输出、彩色渲染图输出、展览广告设计、地理信息系统(GIS)图输出、大幅面海报打印、户外看板制作等业务的大幅面彩色输出中心来说,只有拥有具备打印质量精美、操作灵活、价格低廉、出图速度快、打印模式多样以及提供户内、户外两种大容量供墨方式的喷墨打印输出设备,才能如虎添翼,接洽高精度的输出业务,在激烈的市场竞争中立于不败之地。

近年来,市场上已出现了不少品牌的大幅面喷绘机,例如安凯公司的 NovaJet 850、惠普公司的 HP Designjet 5000 系列大幅面喷绘机、YASELAN 的 YSL-D3500E、NUR SALSA 系列以及 EPSON STYLUS PRO 10000。目前,国内也出现了一些具有一定开发实力的公司。图 1-1 所示是上海雅色兰公司生产的

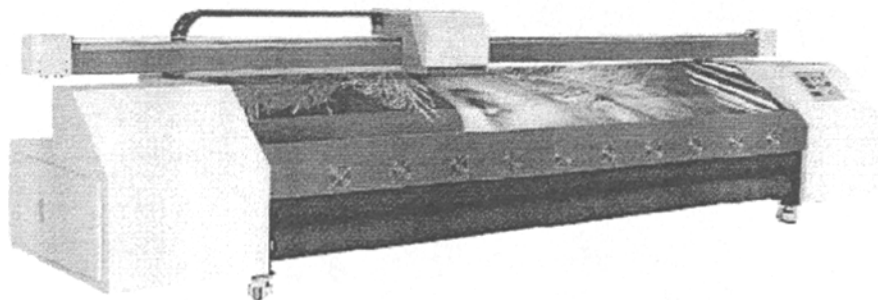


图 1-1. YSL-D2600 型大型喷绘机外观图

Fig1-1. YSL-D2600 plotter

YSL-D2600 型大型喷绘机。

该机的技术参数如下:

适用范围: 户外大幅面的广告宣传画, 舞台背景, 后打光展幅, 车身广告等; 户内小幅装饰画、海报、商品陈列推广, 橱窗展示等

喷绘幅宽: 3.4 米, 长度不限

喷头型式: 微压电式

喷头型号: Spectra Nova 256/80

喷头数量: 256 孔×8 个

分辨率: 360DPI

喷绘速度: 高速模式 123 平方米/小时; 标准模式 80 平方米/小时, 精细模式 45 平方米/小时

本论文的任务是对宽幅全彩喷绘机高精度喷绘技术进行研究。宽幅全彩喷绘机是典型的机电一体化高科技产品, 它集成了计算机技术、数字控制技术、微粒爆发喷墨技术(MicroBurst)、通讯接口技术和图形图像处理技术等当今最新的科技成果。高精度喷绘技术是宽幅彩色喷绘机的核心技术之一。

1.2 宽幅全彩喷绘机高精度喷绘技术

宽幅全彩喷绘机要求打印幅度宽, 打印速度高, 打印图象文件的数据传输量大, 连续工作时间长, 其研制主要包含以下关键技术:

1. 计算机技术: 宽幅全彩喷绘机的控制核心通常是一台高性能的计算机。喷绘机整机的工作均由主控计算机来控制。因此, 计算机软, 硬件的设计是十分重要的;
2. 数字控制技术: 为了保证打印质量。喷绘机的运动控制系统, 打印头控制系统等都采用了数字控制技术来实现。它们以电机控制专用集成电路, 大规模可编程逻辑器件的应用为代表;
3. 微粒爆发喷墨技术(MicroBurst): 喷绘机是喷墨打印机的一种。打印头是将墨滴喷射到打印介质上来形成图案的, 对喷墨墨滴的控制是该领域研究的重点;
4. 通讯接口技术: 喷绘机工作时要保证大流量打印数据传输的正确, 通畅。通讯接口成为喷绘机的一项重要技术指标;
5. 图形, 图像处理技术: 输出图形的质量对喷绘机接收打印图形的质量提出了要求。图形, 图像处理的方法要做到打印质量, 打印速度兼顾;

高精度喷绘技术是指实现控制打印头按一定精度要求进行工作的技术。包括运动控制技术, 打印头控制技术和运动控制和打印头控制的连接。高精度喷绘技术包含多项喷绘机研制的关键性技术如计算机技术, 数字控制技术, 通讯技术等。

1.3. 本论文的主要工作

课题组的任务是研制以 PC 机为控制核心的宽幅全彩喷绘机。本论文的主要工作是对喷绘机的高精度喷绘技术进行分析和讨论。包括运动控制系统, 打印头控制系统以及两者的连接技术。文章的主要内容如下:

1. 宽幅全彩喷绘机控制系统的结构;

2. 宽幅全彩喷绘机运动控制系统的实现；
3. 宽幅全彩喷绘机打印头控制系统的实现；

第二章 宽幅全彩喷绘机工作原理及系统组成

2.1 宽幅全彩喷绘机工作原理

三米宽幅全彩喷绘机的主要要求如下：

- 适用范围：户外大幅面的广告宣传画，舞台背景，后打光展幅，车身广告等；户内小幅装饰画、海报、商品陈列推广，橱窗展示等；
- 喷绘幅宽：3.4 米，长度不限；
- 命令语言 RTL；
- 喷头数量：8（四色 8 喷头）；
- 分辨率：300DPI(可用 300DPI 以下)；
- 喷绘速度：高精度速度 28 平方米/小时，标准速度 47 平方米/小时；
- 颜色：1670 万种；
- 油墨：进口专用油性油墨，防水，防紫外，户外二年不褪色；
- 接受文件：TIFF(RGB&CMYK)，BMP，EPS，POSTSCRIPT，JPEG；
- 打印模式：单向，双向；

喷绘机的结构示意图见图 2-1 所示。整机包括：

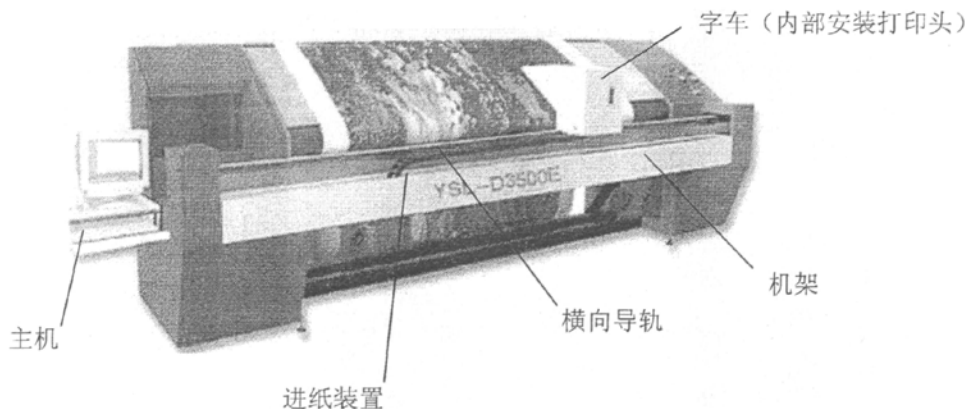


图 2-1. 打印机结构示意图

Fig2-1. plotter structure

- 机架：提供喷绘操作工作支撑平台，是喷绘机的机械本体；
- 主机：喷绘机控制核心，由一台计算机担任，是系统的控制中心；
- 横向导轨：打印工作时给字车以支撑，字车在导轨上来回横向运动进行打印；
- 字车：内部安装有打印头组件，按照主机的控制横向移动进行打印；
- 进纸装置：对打印介质（打印纸）进行进给操作，保持打印的连续性。

喷绘机的任务是将通过计算机编辑的打印文件按相应的技术指标打印在介质上，喷绘是一个复杂的工作过程。

2.2 喷绘机控制系统组成

喷绘机控制系统分控制系统硬件和软件两部分来介绍。

2.2.1 喷绘机控制系统硬件结构

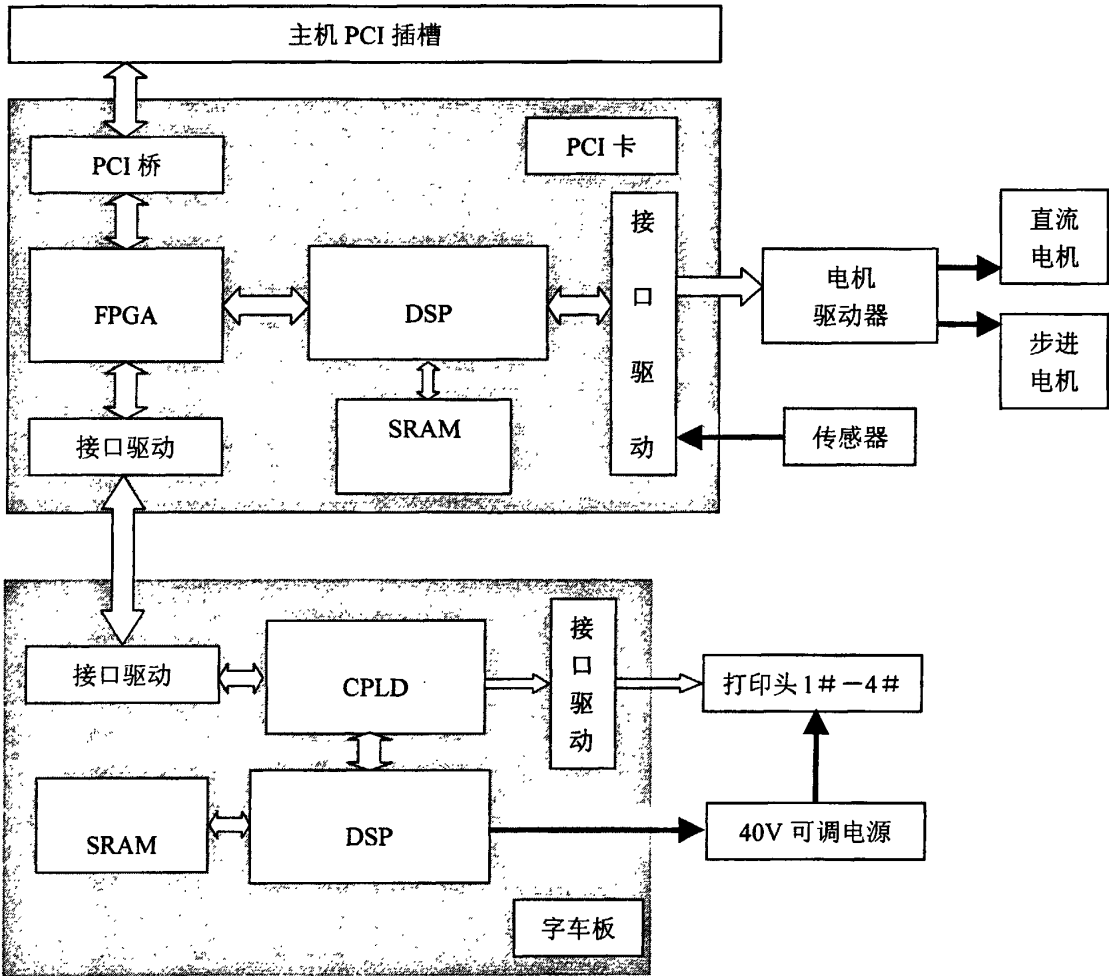


图 2-2. 控制系统硬件组成框图
Fig2-2. hardware structure of control system

控制系统的硬件结构见图 2-2 所示。硬件是以一台 PC 机为中心设计的。包括一块插在主机 PCI 总线插槽上的 PCI 控制卡和一块安装在字车上随字车来回做横向运动的字车板。以下将详细介绍这两块电路板。

PCI 控制卡：PCI 控制卡是 PC 机作为喷绘机控制中心的扩充。

其主要功能有：

接受打印数据：打印数据通过主机 PCI 总线向硬件进行下传。为此 PCI 控制卡要能实现 PCI 总线的通讯协议。可靠，高效地接收打印数据。卡上采用了 PCI 桥芯片来实现 PCI 协议；

打印数据缓存：打印数据从 PCI 总线获得后将按要求送往打印头。从数据的接收，发送来看。数据的传输带宽，流量相差是很大的。所以要建立打印数据缓冲区以匹配两边的通讯。PCI 控制卡上有一块 FPGA 来建立这样的数据缓冲区；

打印时序生成：向打印头发送的打印数据是串行发送的，而且必须按照打印头的技术要求生成打印时序，有严格时序要求的相关打印信号一并送往打印头。此项功能也是由卡上的 FPGA 来完成的；

运动控制：打印过程中字车需要来回横向移动，进纸操作要求能沿纵向进行进纸，退纸操作。这些是喷绘机运动系统的任务。而且运动控制系统要和打印数据的传输建立联系。卡上的 DSP 是运动控制系统的核心。它完成两个电机的控制和相关传感器信号的采集，处理；

接口：PCI 卡生成的打印数据要传送到字车板，最终再送到打印头。因此，PCI 卡上设置了用于数据传输的接口电路。它由 8 位总线驱动器构成。由于信号要传送的距离超过两米，所以接口的作用是很重要的，接口保证了数据传输的可靠性；

字车板：字车板是直接连接打印头的硬件。

其主要功能有：

打印头配置数据加载(Configuration)：打印头在工作前需要进行 1020 个配置数据的加载，我们称这一过程为打印头的 Configuration。字车板上的 CPLD 完成了 Configuration 的过程。加载数据，加载时序均由 CPLD 实现；

传输打印数据：打印数据从 PCI 卡下传到字车板上后，直接进入 CPLD，然后由 CPLD 送往打印头，在 CPLD 内部为打印数据建立了通信通道；

打印头温度补偿：打印头是靠压电效应来工作的，工作时需要正 40V 左右的电压给压电驱动器供电。打印头温度变化，需要对打印头进行该供电电压的调整。这一功能由板上的 DSP 芯片来完成；

接口：接收打印数据，向打印头发送打印数据均通过了接口电路。保证了打印信号的正确传输；

此外，系统硬件还包括电机驱动板，可调电源板等。

2.2.2 喷绘机控制系统软件结构

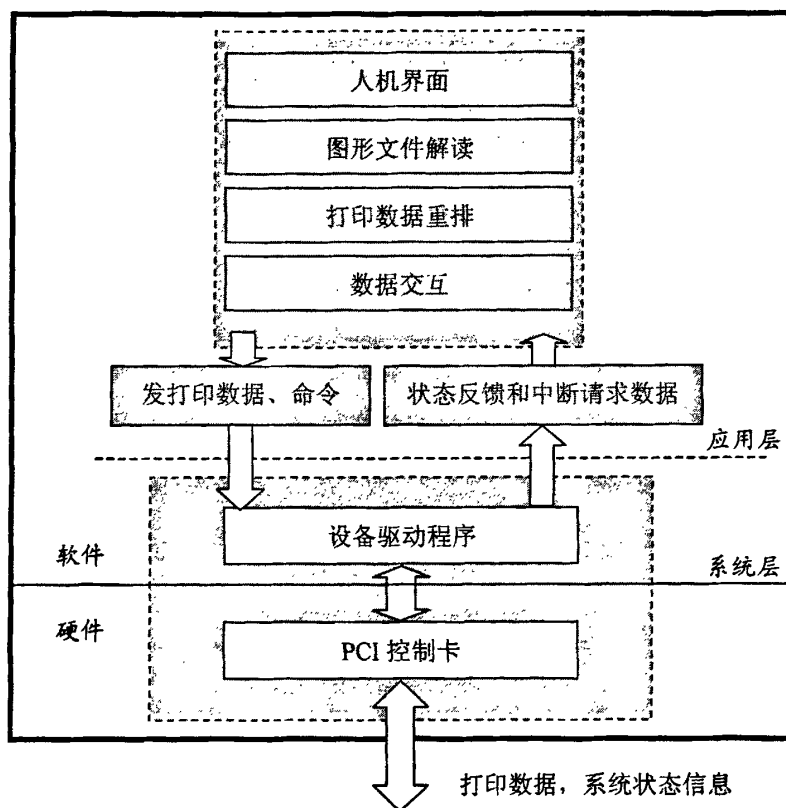


图 2-3. 控制系统软件结构

Fig2-3. software structure of control system

控制系统的软件主要介绍在主控计算机上运行的软件的结构和功能。软件的结构见图 2-3 所示，可分为系统层，应用层。系统层主要是指 PCI 控制卡的驱动程序。这是对系统硬件的第一层扩充。并为应用层提供软件接口。应用层主要完成和用户进行交互，接收待打印图形，与驱动程序通讯等工作。

控制系统软件包括：

人机界面：是操作者操作喷绘机的平台。负责接收操作者命令，反馈系统状态信息；

图形文件解读：要进行打印的是以图形格式保存的打印文件，而向下传送的是具体的打印数据。因此，需要对图形文件进行解析，使数据与打印头对应；

打印数据重排：按颜色把一幅要打印的图形数据分配到 4 个打印不同颜色的打印头上。需要对数据进行重排，建立合理的数据结构；

数据交互：应用程序不能直接操纵硬件，需要驱动程序作为接口。驱动程序和应用程序建立了数据和命令通道，用来下传打印控制命令，数据和返回系统工作状态。

2.3 小结

本章介绍了喷绘机控制系统的构成。从控制系统硬件，软件的角度进行了详细的分析和讨论。主要包括各模块的功能和结构以及它们之间的接口。

喷绘机控制系统的硬件采用了 PCI 控制卡和字车板相连接的结构。一方面充分利用了 PCI 总线的传输速率高，流量大的特点。另一方面 PCI 控制卡上完成了喷绘的主要功能，这样就能发挥计算机强大的处理功能。为高性能喷绘机提出了一个有效的实施方案。字车板上完成了打印头的配置，温度补偿等工作，这些工作不需要计算机的干预，使字车成为相对独立的一部分。这样的设计对今后采用不同通讯接口的喷绘机来说都是有参考价值和实用意义的。

喷绘机控制系统的软件设计分为系统级和应用级。控制软件指挥着整个喷绘机的工作。系统级为 PCI 控制卡进行了第一层扩充，为应用层提供了数据交互的接口。应用层按照层次化设计的思想，为用户提供了操作友好的操作界面。图形处理，数据重排等操作在 PC 机上完成。PC 机强大的处理功能提高了喷绘机整机的技术水平。为喷绘机控制软件的设计提出了一条可行的思路。

第三章 运动控制系统

3.1. 运动控制系统的任务

运动控制系统由字车直流电机控制和进纸步进电机控制组成。字车运动系统所完成的功能是根据被打印图像的要求,在主控计算机的控制下左右(横向)移动打印头组件。进纸运动完成的动作是按照主控计算机的指令对打印纸张进行进给。两个运动的关系见图 3-1 所示。字车上安装的是打印头组(1#-4#打印头)。

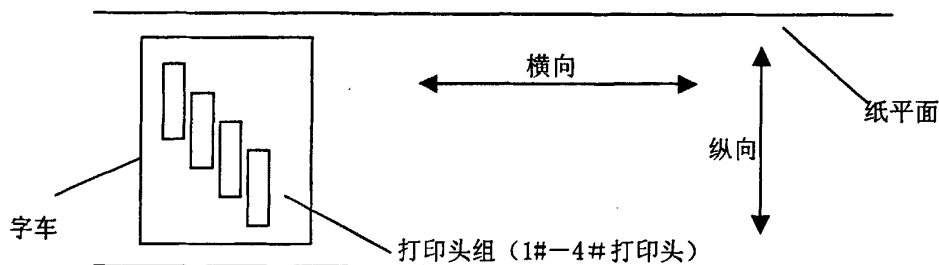


图 3-1 打印机运动系统示意图
Fig3-1. motion system of plotter

字车运动的方向和进纸方向是图 3-1 中所示的横向和纵向。

打印工作时系统对运动控制提出了以下要求:

1. 字车运行平稳,尽量抑制运动过程中的抖动。因为打印头是按位置进行打点的,所以字车的平稳运行,将有利于建立起打印头的控制时序;
2. 能根据打印要求和字车运动当前状态来下达命令控制打印数据流。以此实现控制通道和数据通道的连接。PCI 控制卡上的 DSP 完成系统的主要控制功能, FPGA 则负责数据接受缓存,产生时序,数据下传。因此 DSP 和 FPGA 的接口是实现控制通道和数据通道相连接的途径。运动控制需能控制打印数据流;
3. 字车运动系统所能达到的运动精度在很大程度上决定了喷绘机的横向分辨率。而且,字车运动系统的横向(左右)运动速度还是决定喷绘机的打印速度的关键因素之一;
4. 纵向进纸系统负责控制媒介(如纸张)的进给。它的运动精度是直接影响喷绘机的纵向分辨率的决定性因素。因此,要求对它实现较高精度的运动控制;
5. 与字车运动系统不同的是,由于很难获得纸张进给的位置信息,也就是说不能获得反馈信息,所以该运动系统应是一个开环运动控制系统。所以为了实现高精度的控制,马达采用了步进电机;

3.2. 运动控制系统的结构

运动控制的结构组成如图 3-2 所示。运动控制系统的核心是一块 DSP 芯片。DSP 通过 RS-232 通讯接口从主控计算机得到运动控制指令。DSP 根据这些运动

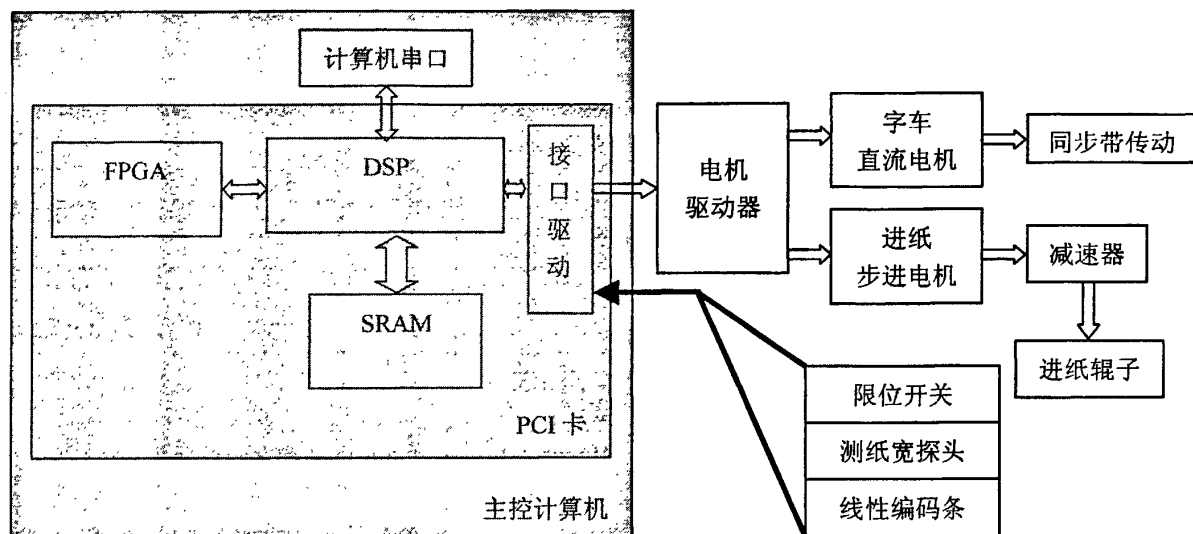


图 3-2. 运动控制系统结构框图

Fig3-2 motion control system structure

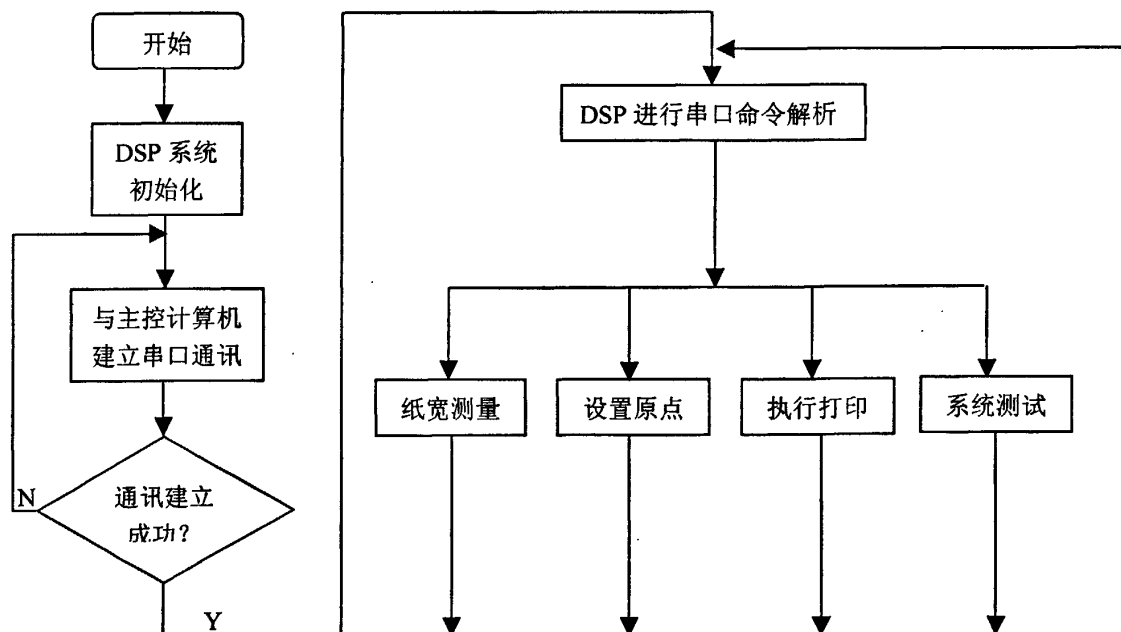


图 3-3. DSP 工作流程图

Fig3-3 DSP operation flow

控制指令来完成相应的操作。这些操作也正是以上运动控制系统所必须满足的要求。运动控制指令包括：

- 系统工作使能;
- 进行打印工作前的原点位置调整, 纸宽测量;
- 打印模式设定: 该行字车行进脉冲数, 打印 PASS 数, 打印方向;

字车直流电机驱动器接受 DSP 的控制指令驱动电机的运动, 电机通过同步带来带动字车的运动, 字车架在水平铺设的导轨上, 在导轨的支撑下来回移动。进纸步进电机通过减速皮带来带动进纸辊子的转动以达到进纸的目的。DSP 的工作流程见图 3-3 所示。

打印工作时, DSP 根据接受到的控制指令执行相应的操作。

DSP 系统初始化: DSP 是控制通道的核心。在打印工作开始之前, DSP 需对自身进行初始化操作。括: DSP 芯片工作频率设定; 串口通讯模式设定; 外部总线操作周期设定; 特殊功能口设定, 如 PWM 输出, QEP 捕捉输入, 数字量 GPIO 设定等; 中断设定;

与主控 PC 进行通讯连接: DSP 通过 RS-232 与主控计算机进行通讯, 以获得打印控制命令, 反馈系统工作状态信息;

纸宽测量: 在打印开始前需对打印介质的横向宽度进行测量, 之后的打印将被局限在这个宽度内进行。DSP 采集测纸宽传感器的输出信号来判断纸的边缘。纸的边界是打印操作的硬边界:

设置原点: 每一行的打印操作均以同一起点为标准。这一起点称为打印原点。当 DSP 进行纸宽的测量结束后, 便在 DSP 系统内保存了打印的原点信息。这样经过每行的打印才能形成图形;

正常打印: 当系统认为准备就绪后便可进行打印了。DSP 执行打印时的运动控制任务, 同时向 FPGA 发送打印控制命令。以控制打印数据流的模式;

打印工作时 DSP 向 FPGA 发送的信息有:

- 打印 PASS 数;
- 打印方向;
- 打印使能信号;

另一方面 DSP 还可以通过对 FPGA 进行读操作来获取以上写操作的的结果, 以验证写操作的正确与否。

通过以上三方面的控制和命令状态的读取。实现控制 FPGA 形成的打印数据流的目的和控制通道和数据通道的连接。

3.2.1. DSP 芯片简介

这里采用了 DSP 芯片来完成运动控制的任务。DSP 是数字信号处理器(Digital

Signal Processor)的英文缩写,是伴随着微电子学、数字信号处理技术、计算技术等学科的发展而产生的,是体现这三个学科综合科研成果的新器件。由于它特殊的结构设计,可以把数字信号处理中的一些理论和算法实时实现,并逐步进入控制器市场,因而在计算机应用领域中得到了广泛的使用。

DSP 主要以数字的方式来处理模拟信号,它通常是收入一系列信号值,对它们进行过滤或做一系列操作,例如建立一支待过滤的信号值队列或者对输入值进行一些转换。DSP 通常是将常数和值进行加法或乘法运算后,先形成一系列串行条目,再逐条地予以累加,它担当了一个快速倍增/累加器(MAC)的作用,并且常常在一个周期中执行多次 MAC 指令。

为了减少在建立串行队列时的额外消耗,DSP 有专门的硬件支持,安排地址提取操作数和建立起一些条件,用以判断是继续计算队列里的元素还是已经到了循环的末尾。

DSP 的主要特点可以概括如下:

1. 哈佛结构
2. 用管道式设计加快执行速度
3. 在每一时钟周期中执行多个操作
4. 支持复杂的 DSP 编址
5. 特殊的 DSP 指令
6. 面向寄存器和累加器
7. 支持前、后台处理
8. 拥有简便的单片内存和内存接口

世界上第一片 DSP 芯片是 1978 年 AMI 公司发布的 S2811,但最成功的 DSP 芯片当数美国德克萨斯仪器公司(Texas Instruments 简称 TI)的 TMS320 系列。除此之外,美国模拟器件公司(Analog Devices 简称 AD)推出的 ADS21xx 系列, Motorola 公司的 DSP 产品 MC56xx 系列。目前,从 DSP 市场份额来看, TI 公司的 DSP 约占市场份额的 50%,是世界上最大的 DSP 生产厂家。表 3-1 是各家 DSP 生产厂家的 DSP 产品列表。

表 3-1 DSP 产品列表

公司	DSP 芯片	推出时间(年)	MAC 周期 (ns)	定点位数	浮点位数
AMI	S2811	1978	300	12/16	
NEC	uPD7720	1980	250	16/32	
	uPD77230	1985	150		32

TI	TMS32010	1982	390	16/32	32/40 32/40
	TMS32020	1987	200	16/32	
	TMS320C25	1989	100	16/32	
	TMS320C30	1989	60		
	TMS320C40	1992	40		
	TMS320C50	1990	35	16/32	
	TMS320C203	1996	12.5	16/32	
	TMS320C62xx	1997	5	16/32	
Motorola	MC56001	1986	75	24	32/44
	MC96002	1990	50		
	MC56002	1991	50	24/48	
AD	ADSP2101	1990	60	16	32/40
	ADSP21020	1991	40	32	
AT&T	DSP32C	1988	80	16/24	32/40
	DSP16A	1988	25	16/36	
	DSP3210	1992	60	24	

*注：上表中浮点位数一栏中未标注位数的说明该系列 DSP 只有定点系列。其中 32/40 表示 DSP 加法是 32 位，乘法 40 位。

TMS320C240× DSP 芯片是 TI 推出的用于马达控制，数字控制的性能非常优秀的芯片。

TMS320C240×属于 TI C2000 系列。该系列的 DSP 专为马达控制，数字控制而设计。这一系列包括多款芯片，它们分别有自己的应用场合。见图 3-4：

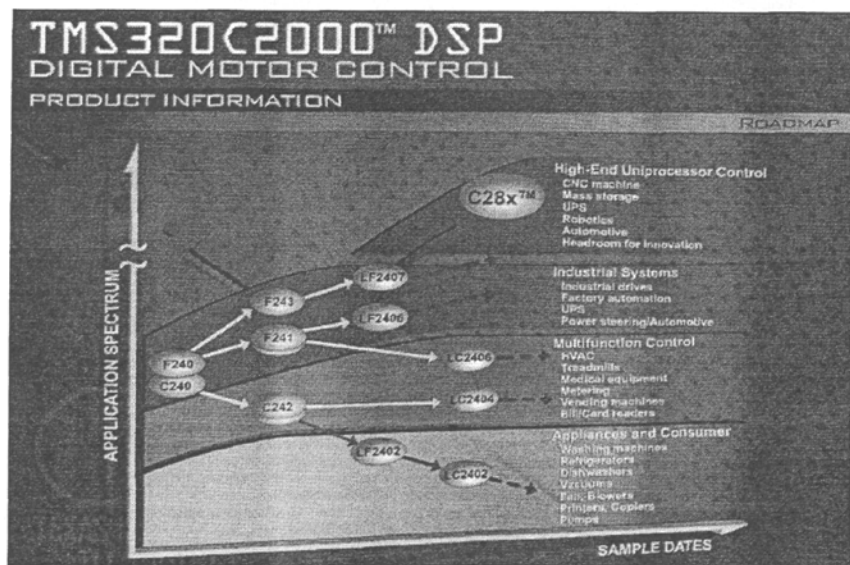


图 3-4. C2000 系列 DSP 产品发展过程

Fig3-4. C2000 DSP product development process

我们这里选择的是 TMS320C240× 芯片。它主要应用于：

工业驱动;
工厂自动化;
UPS 电源;
功率控制自动化;
以下简要介绍一下TMS320C240×的主要性能:

High-Performance Static CMOS Technology

33-ns Instruction Cycle Time (30 MHz)

30-MIPS Performance

Low-Power 3.3-V Design

Based on TMS320C2xx DSP CPU Core

On-Chip Memory

Up to 32K Words x 16 Bits of Flash

EEPROM (4 Sectors)

Up to 2.5K Words x 16 Bits of Data/Program RAM

544 Words of Dual-Access RAM

Up to 2K Words of Single-Access RAM

芯片内部资源有:

C2XX DSP CORE^[1]

On chip DARAM , SRAM , FLASH

External memory interface

Event manager A,B

PLL

SCI , SPI , CAN

GPIO (general purpose digital I/O)

Watchdog

10-bit ADC

从芯片的硬件结构上可以看出DSP对电机控制有很好的硬件支持。DSP可以很方便地实施脉宽调制, 矢量控制, 死区控制等。非常适合交流, 直流电机的控制。

3.2.2. DSP 最小系统

DSP最小系统主要讨论DSP芯片的存储配置，运行模式。这部分是设计基于

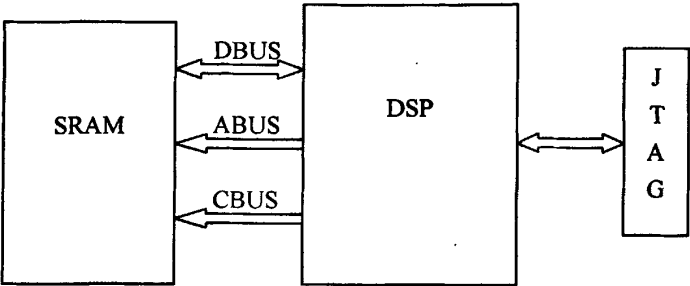


图 3-5. DSP 最小系统结构框图

Fig3-5. DSP system

memory maps – LF2407

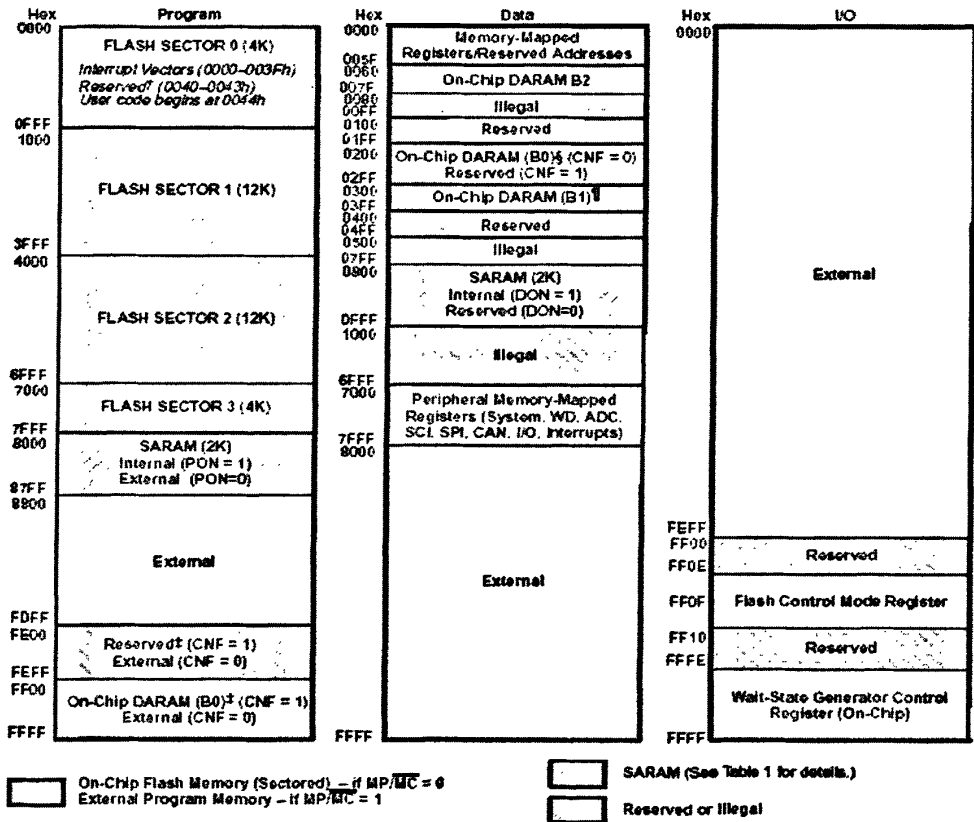


图 3-6. DSP 存储空间映射

Fig3-6. DSP memory map

DSP控制系统的基础。本系统的DSP最小系统组成如图3-5所示，DSP外扩了一块SRAM作为片外存储器。这是一款3.3V接口的高速SRAM（tAA=12ns，tAA——访问时间）容量为：64K。它可以与3.3V的DSP直接接口。

SRAM映射为DSP的PROGRAM SPACE和DATA SPACE。存储配置由DSP的

CMD^[2] (linker command files Link) 决定。CMD文件用于DSP代码的定位。由于DSP的编译器的编译结果是未定位的，DSP没有操作系统来定位执行代码，每个客户设计的DSP系统的配置也不尽相同，因此需要用户自己定义代码的安装位置。TMS320LF240×的memory maps如图3-6所示。在系统仿真时SRAM作为数据存储器 and 程序存储器，CMD文件将保证两空间不出现重叠。这时DSP工作在MC(Microcomputer)方式。

在系统独立即DSP能脱开仿真机进行自主运行时，运行结果就是系统正常运行时的结果。这时SRAM运行时作为数据存储器，程序存储器是DSP片内的FLASH。DSP工作在MP (Microprocessor) 方式。CMD文件分为两个区MEMORY区和SECTIONS区。

MEMORY：分配PROGRAM空间和DATA空间的起始地址和长度。PAGE0，默认为程序空间，PAGE1，默认为数据空间；

SECTIONS：分配代码段，数据段，堆栈段，C语言特定段，中断向量段等的所在空间及其在此空间的所在位置；

DSP 和 FPGA 的连接

DSP通过自身的并行总线与FPGA连接，这时FPGA对DSP来说是DSP外部总线上的设备。DSP通过其I/O空间来访问FPGA。FPGA内映射若干寄存器来供DSP

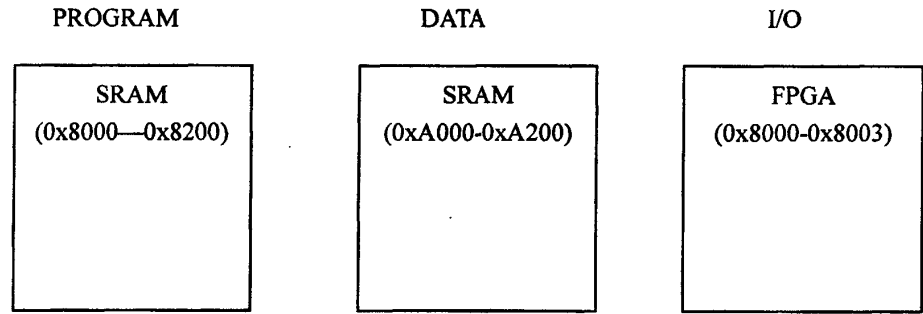


图 3-7. DSP 空间分配情况
Fig3-7. DSP memory location

进行读写，以达到DSP和FPGA通讯的目的。DSP系统的空间映射见图3-7。

注：图3-7是DSP系统仿真时的空间映射图，在系统独立运行时 PROGRAM SPACE 由DSP片内FLASH取代，其余空间同上。

3.2.3. 运动控制系统前向通道

运动控制系统的前向通道是负责把打印状态的相关信息传送到 DSP 进行处

理的环节。这是由一系列传感器来完成的。主要的传感器有：

横向限位开关

喷绘机字车运动的轨道两端安装有限位开关，以此来设置打印过程运动部件的硬边界。同时也是运动控制的安全边界。限位开关输出是 TTL 电平信号。信号直接由 DSP 的 GPIO 端口进行采集，进入 DSP 进行处理。

线性编码条及探头

一条线性编码条横向铺设在支撑字车运动的导轨上，它提供了字车横向定位的刻度信息。一探头安装在字车的下面，由这一探头获得方波输出信号。探头的输出是两相相差 90 度的方波信号（见图 3-8）。这两路信号同时通向 DSP 和

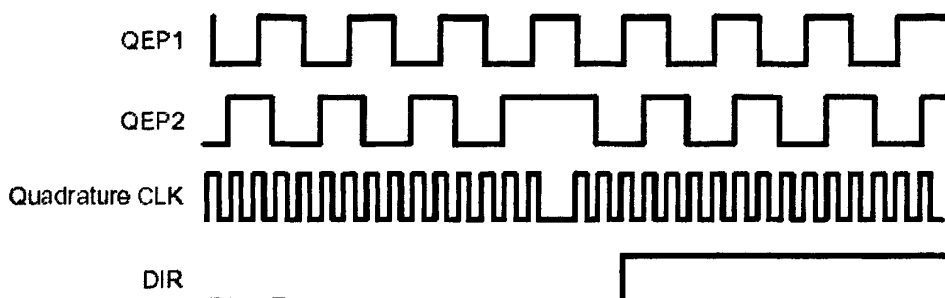


图 3-8. 编码条输出信号(QEP1, QEP2 分别是 DSP 用来采集编码条两路输出信号的功能口)

Fig3-8.output of encoder(QEP1 and QEP2 are the QEP of DSP)

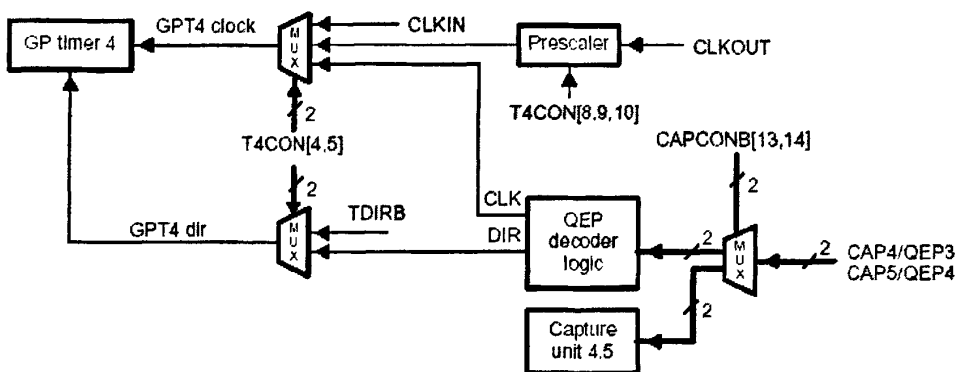


图 3-9. DSP 内部 QEP 结构

Fig3-9. structure of QEP of DSP

FPGA。

DSP以QEP (Quadrature Encoded Pulses) 硬件来捕捉这两路方波 (QEP1,QEP2) QEP的硬件结构如图3-9所示，这里选择QEP3,QEP4工作方式，QEP3,QEP4作为T4 COUNTER的时钟来源。DSP的内置QEP功能将判断QEP3，QEP4哪一个超前。并以此判断字车运动的方向。即DIR=0 正向，DIR=1 反向。

DSP程序读取T4COUNTER的数值来得到当前的位置信息。T4COUNTER的时钟源（Quadrature CLK）将是QEP单向方波频率的4倍。这样编码条传感器就实现了提供横向位置信息的功能。

表 3-2 是字车在不同速度下运动时 QEP 单向方波频率的数值

已知：编码条分辨率最低是 150DPI（即每英寸单向输出 150 个脉冲 150 pulses/inch）

表 3-2 编码条信号频率典型值

字车运动速度（mm/s）	单向方波频率（KHZ）
10	0.59
20	1.18
30	1.17

DSP对频率为以上范围的方波做采集是满足DSP硬件要求的。

测纸宽传感器

测纸宽传感器用来对纸的宽度进行测量以设定打印的硬边界。该传感器是光电反射式传感器，利用纸面和金属表面对光信号的反射不同来确定纸的覆盖范围。从而得出纸的宽度。纸宽信息对打印图象的横向像素点数目起到了参考和限制作用。这也是打印机的系统性能指标之一。

3.2.4. 运动控制系统后向通道

运动控制系统的后向通道是指电机驱动器。这里电机驱动器包括直流电机驱动器，步进电机驱动器。驱动器的设计均采用电机控制专用集成电路，以提高系统的可靠性。以下将分别介绍直流电机驱动器，步进电机驱动器的结构。

直流电机驱动器

直流电机驱动器接受DSP发送的PWM信号，进行功率放大，再去驱动电机运

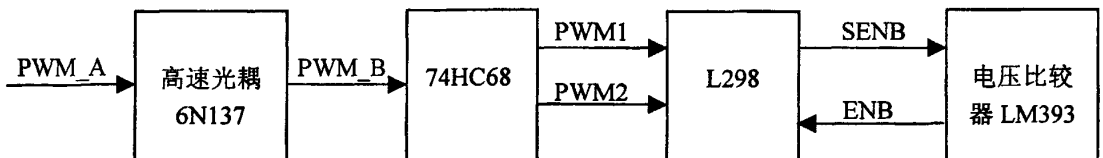


图 3-10. 直流电机驱动示意图

Fig3-10. structure of DC-MOTOR driver

行。这一过程的示意图见图3-10所示。

以下是驱动电机的 PWM 控制信号在各个阶段的信号特性：

PWM_A: 从 DSP 获得的原始 PWM 信号。该信号直接决定电机的转速;

PWM_B: 由于 DSP 发送到电机的控制信号需经过功率放大环节。所以在 DSP 和功放之间要进行电气隔离。防止功率部分对 DSP 控制部分的电气影响。这里考虑到是对 PWM 信号进行隔离。所以选择了快速性能很好的高速光耦 6N137。保证经过光耦后的 PWM 信号不会产生波形失真。

PWM_1,PWM_2: PWM_1,PWM_2 是 PWM_B 经过高速异或门 74HC86 后的两路输出。是 PWM_B 分别与 '1' 和 '0' 异或的结果。即得到与 PWM_B 同相, 反相的两路信号。PWM_A ,PWM_B, PWM_1, PWM_2 相互关系见图 3-11 所示。它们的相位关系可表示如下:

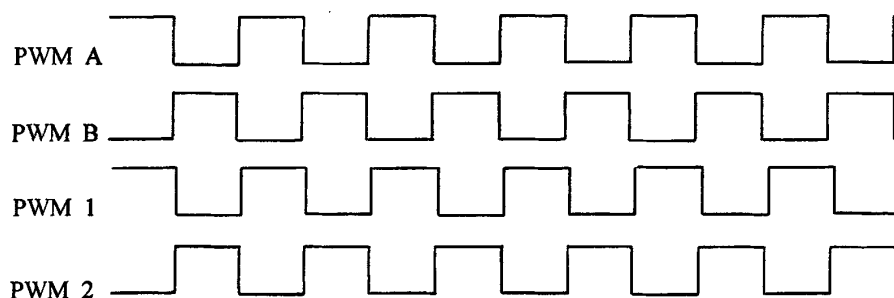


图 3-11. 控制信号在各阶段的时序关系

Fig3-11. control signal timing at different point of circuit

$$\text{PWM_A} = \text{not PWM_B};$$

$$\text{PWM_1} = \text{PWM_B xor '0'};$$

$$\text{PWM_2} = \text{PWM_B xor '1'};$$

PWM_1, PWM_2 构成两路相差 180 度的 PWM 信号分别送入 L298 的 10 号和 12 号管脚。作为功率管的基极控制信号。驱动部分电路图见图 3-12 所示。

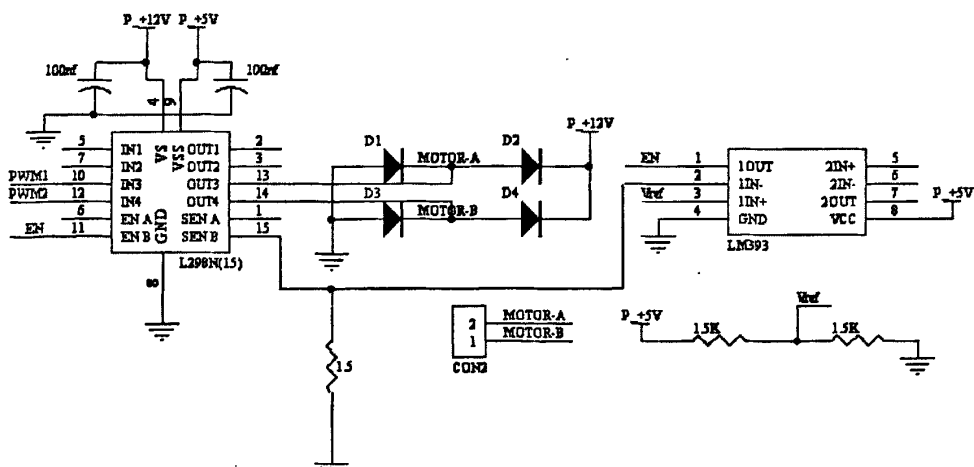


图 3-12. 直流电机驱动器电路图

Fig3-12. DC-MOTOR driver circuit

MOTOR_A和MOTOR_B是电机的绕组接线端子。

L298属于电机控制专用集成电路。是一种集成度很高的功率电子器件。它内部的结构和引脚说明如图3-13所示。L298芯片是一种高压、大电流双全桥式驱

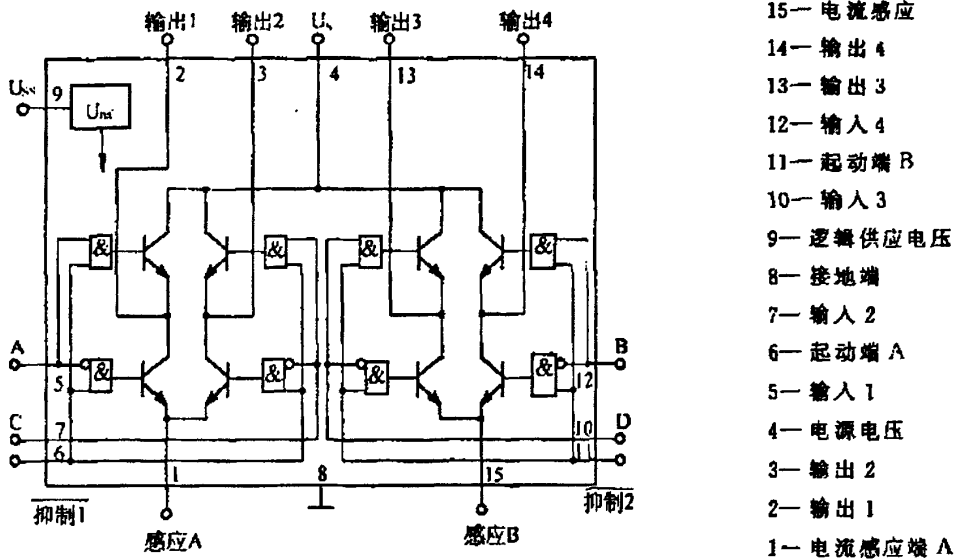


图 3-13 L298 内部结构和管脚说明

Fig3-13. L298 logic diagram

动器，其设计是为接受标准TTL逻辑电平信号和驱动电感负载的、例如继电器、圆筒形线圈、直流电动机和步进式电动机。功率驱动最高电压为46V。具有两抑制输入来使器件不受输入信号影响。每桥的三极管的射极是连接在一起的，相应外接线端可用来连接外设传感电阻。可安置另一输入电源，使逻辑能在低电压下工作。

LM393的作用在于在电机过流时保护功放部件。LM393内部集成了两组电压比较器。其管脚见图3-14所示。

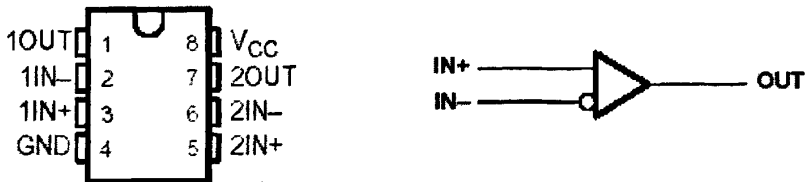


图 3-14. LM393 结构简图

Fig3-14 logic diagram of LM393

L298单个桥电路的极限电流是2A。所以功率部件的保护是以这一指标来设计的。L298反馈测量电阻选择 1.5Ω 的功率电阻。这样保护电路应对 $1.5 \times 2 = 3V$ 的电压产生动作。LM393的 $1IN+$, $1IN-$ 分别与参考电压, 反馈电压相接。 $1OUT$ 与L298的ENB相接。ENB控制着DSP控制信号(PWM_1, PWM_2)对功率管基极开关控制的允许端。参考电压 V_{ref} 是通过电阻分压得到的。数值为: $5 \times 1.5 / 3 = 2.5V$ 。这样的设计保证了在电机过流能及时切断PWM_1, PWM_2对L298的桥电路基极的控制。H桥内的四只功率管截至。从而保护功率部件。

DSP向功放发送PWM_A控制信号。而直接作用于功放的是PWM_1, PWM_2信号。两个信号的占空比的和是100%。当PWM_1的占空比 > PWM_2的占空比时, 电机正转。当PWM_1的占空比 < PWM_2的占空比时, 电机反转。当PWM_1的占空比 = PWM_2的占空比时, 电机停止。L298输入控制信号关系见图3-15

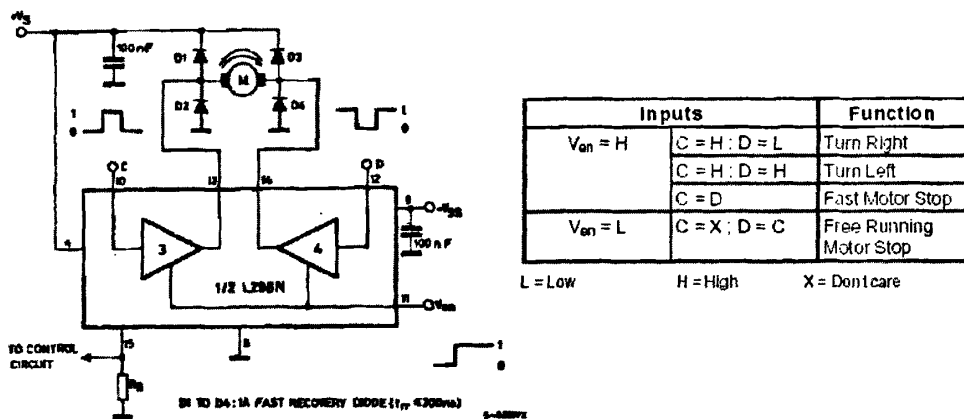


图 3-15. 直流电机和 L298 的连接

Fig3-15. connection between DC-MOTOR and L298

所示。

电机的绕组是一个感性负载和一个阻性负载的串联。PWM_A控制信号的频率必须与电机绕组的时间特性参数相适应, 否则电机在运行时将发生高频鸣叫, 或低频抖动。根据电机的技术参数和现场实验。选择PWM_A信号的频率为: 65KHZ。

字车直流电机采用的是美国PITTMAN公司生产的PITTMAN LO-COG型直流伺服电机。该电机的技术参数见表3-3所示。

表 3-3: PITTMAN LO-COG 型直流伺服电机技术参数

技术参数名称	参数数值
额定工作电压 E (V)	19.1
反电势系数 K_e (V/rad/s)	28.7×10^{-3}

电磁力矩系数 K_t (Nm/A)	28.7×10^{-3}
绕组阻抗 R_t (Ω)	1.89
绕组感抗 L (mH)	1.56
空载电流 I_m (A)	0.21
峰值电流 I_p (A)	10.1

步进电机驱动器

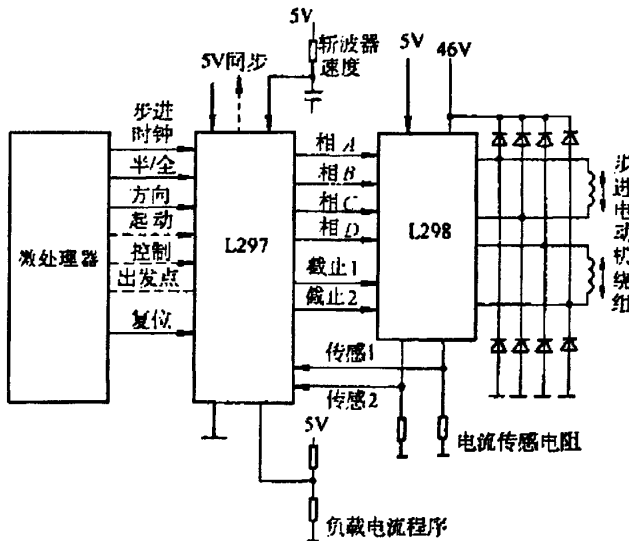


图 3-16. 步进电机驱动器与 CPU 连接示意图

Fig3-16. connection between step motor driver and CPU

电动机控制驱动器。

其中L297是步进电动机控制器(包括环形分配器), L298是双H桥式驱动器。这种方式结合的优点是, 需要的元件很少。从而使封装成成本低, 可靠性高和占

空间少。另外, L297和L298都是独立的芯片, 所以应用是十分灵活的。

L297 芯片的相序产生

对步进电动机的控制实质上就是对步进电动机的通电相序的控制。L297 就是一个控制相序的部件, 它的核心部分是一组译码器, 它能产生各种所需的相序, 这一部分是由两种输入模式控制, 方向控制(CW 和 CCW)

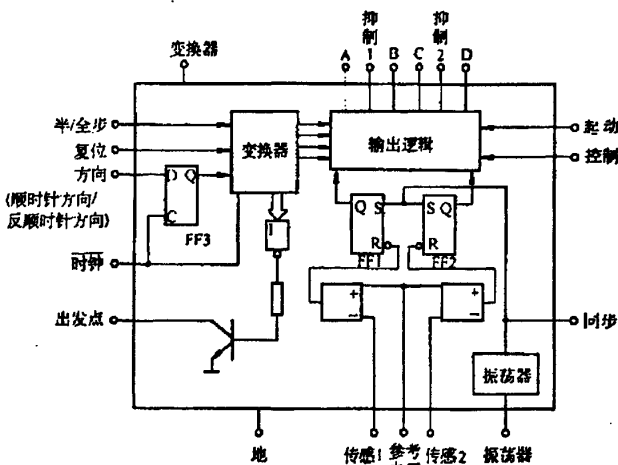


图 3-17. L297 内部结构方块图

Fig3-17.L297 logic diagram

和 HALF/FULL。以及步进式时钟 CLOCK，它将译码器从一阶梯推进至另一阶

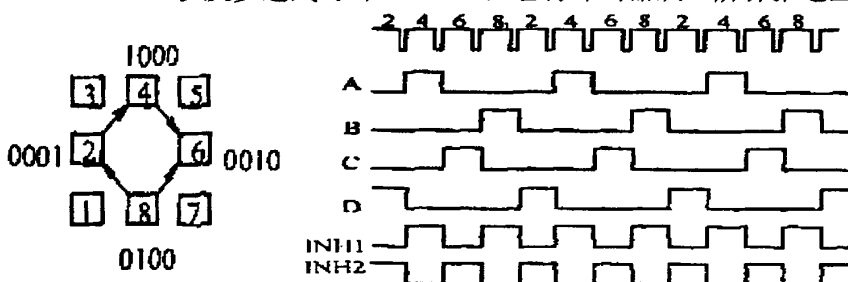


图 3-18. 单四拍，整步方式

Fig3-18. stepping of step motor

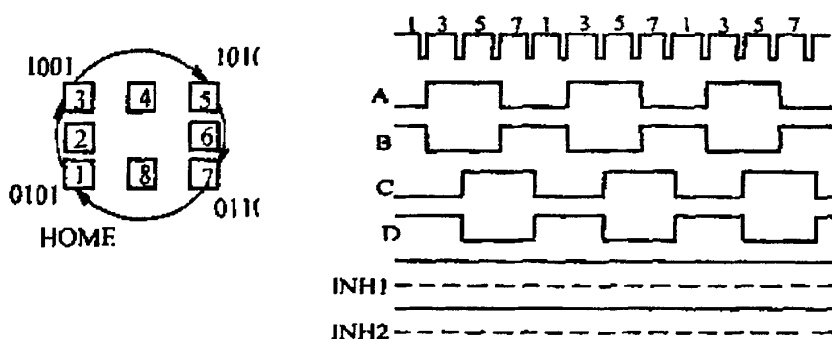


图 3-19. 双四拍，整步方式或称全阶梯

Fig3-19 .stepping of step motor

梯。图 3-17 是 L297 的内部结构方块图。译码器有四个输出点连接到输出逻辑部分，提供抑制和斩波功能所需的相序。因此 L297 可产生三种不同相序。全阶梯模式是将八步程序中漏去间隔的状态而得到。步进时钟脉冲将译码器中三位计数器的第一级旁路而发生。计数器的最后有效位并不受影响，因此，当选择全阶梯模式时，相序的产生有赖于译码器状态(HALF / FULL)输入端为低电平。若选择全阶梯模式，译码器不论在任何偶数状态，都会取得两相连接全步相序，如图 3-18 所示。当译码器在双数状态时，可获得单相连接全阶梯模式，如图 3-19 所示。

步进电机选用日本SANYO公司生产的103型步进电机，其技术参数见表3-4。

表 3-4 型步进电机技术参数

技术参数名称	参数数值
额定工作电压(V)	6
步矩角(DEG/STEP)	0.9
相数	2
相电流(A)	0.85

3. 3V 与 5V 的混接

DSP 是 3.3V 的器件，而传感器输出和电机驱动器接受的都是 5V 的 TTL 电平的信号。系统出现了 3.3V 和 5V 混接的情况。

逻辑电平不同，接口时出现的问题

在混合电压系统中，不同电源电压的逻辑器件相互接口时会存在以下 3 个主要问题：

- 加到输入和输出引脚上允许的最大电压的限制问题；
- 两个电源间电流的互串问题；
- 必须满足的输入转换门限电平问题；

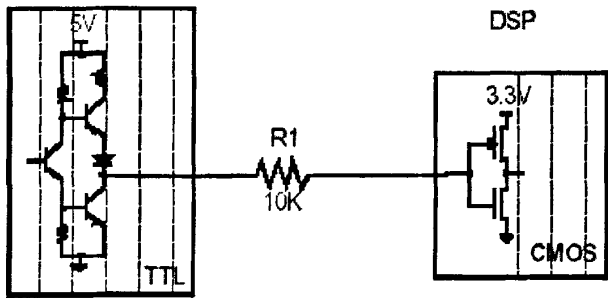


图 3-20. 5V TTL 输出，3.3V CMOS 输入的接法
Ffig3-20.5V TTL output to 3.3V CMOS input

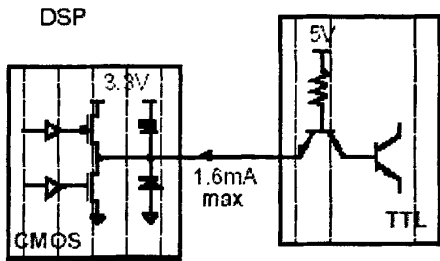


图 3-21. 3.3V CMOS 输出，5V TTL 输入的接法
Fig3-21. 3.3V CMOS output to 5V TTL input

器件对加到输入脚或输出脚的电压通常是有限制的。这些引脚有二极管或分离元件接到 VCC。如果接入的电压过高，则电流将会通过二极管或分离元件流向电源。例如 3V 器件的输入端接上 5V 信号，则 5V 电源将会向 3V 电源充电。持续的电流将会损坏二极管和电路元件。在等待或掉电方式时，3V 电源降落到 0V，大电流将流通到地，这使总线上的高电压被下拉到地，这些情况将引起数据丢失和元件损坏。必须注意的是：不管是在 3V 的工作状态或是 0V 的等待状态都不允许电流流向 VCC。另外用 5V 的器件来驱动 3V 的器件有很多不同情况，同样 TTL 和 CMOS 间的转换电平也存在不同情况。驱动器必须满足接收器的输入转换电平，并要有足够的容限和保证不损坏电路元件。

这里讨论 5V TTL 电平的传感器信号向送入 DSP 和 DSP 带动 5V TTL 门电路的情况。

1. 5V TTL 输出，3.3V CMOS 输入：5V TTL 电平的高电平典型值在带载时为 3.4V，空载时为 4.05V（器件供电电压为允许最大值 5.25V）。3.3V CMOS 器件的最高允许输入高电平数值为：VCC+0.3V。（芯片供电电压为 3.3V）。当考虑芯片接口时最坏的接口情况，即芯片供电电压为 3.0V。这时逻辑高电平的电压

差时 0.75V。在两芯片接口之间串接一 10K 电阻,就可把电流降为 75 μ A 以下。保证了两种电平的安全接口。这时,由于串接电阻及寄生电容产生的延时在一般应用中是可以忽略的,见图 3-20 所示;

2. 3.3V CMOS 输出, 5V TTL 输入: 由于 3.3V CMOS 输出和 5V TTL 是电平兼容的, 因此两者接口时不需要任何中间电路。可以直接连接, 见图 3-21 所示。

3.3. 字车直流电机的控制要求及运行结果

3.3.1 直流电机位置伺服系统

字车直流电机的控制要求电机按照一定的速度曲线运行保持打印过程中的运行平稳。这里采用常用的梯形速度曲线对电机进行速度调节, 见图 3-22 所示。由 DSP 设计出一条升降速曲线。其中包括升速, 恒速, 降速三段。降速结束时恰好达到段结束时恰好达到目标位置。然后, 以升降速曲线求出的位置值作为位置指令, 进行 PID 闭环控制, 一般就不会出现很大的位置偏差, 电动机将大体上按设计的升降速曲线达到目标位置。因此, 字车直流电机的控制是一个位置伺服控制系统。DSP 的控制过程见图 2-23 所示。

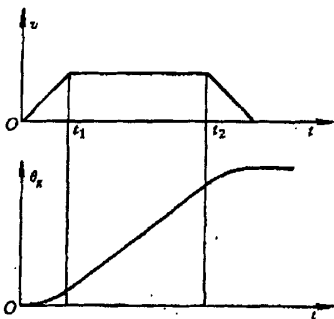


图 3-22. 速度和位置曲线

Fig3-22. speed and displacement waveform

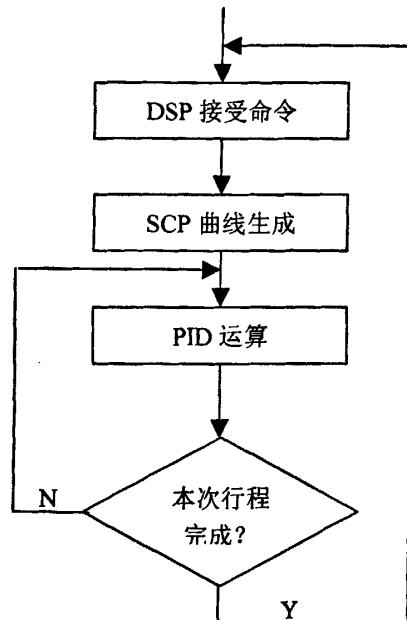


图 3-23. 位置伺服主程序框图

Fig3-23. displacement servo system program flow

位置信号的给定应该按以下方法进行计算:

$$\text{匀加速阶段 } \theta_{g1} = \int v dt = \int a dt = \frac{1}{2} a t^2 \quad t \in (0, t_1).$$

$$\text{匀速阶段 } \theta_{g2} = V_{\max}(t - t_1) \quad t \in [t_1, t_2]$$

$$\text{匀减速阶段 } \theta_{g3} = V_{\max}(t - t_2) - \frac{1}{2} a (t - t_2)^2 \quad t \in (t_2, t_3)$$

$$\text{位置给定值: } \theta_g = \theta_{g1} + \theta_{g2} + \theta_{g3}.$$

则位置伺服系统的控制指令应该包括：本次目标位置 θ_{g_end} ，加速度 a ，匀速阶段速度 V_{\max} 三项。速度生成曲线就是根据这三个值，产生一系列随时间变化的位置给定值 θ_g 。然后由 PID 程序处理。由于目前打印机处于功能实验调试阶段。所以以最简单的打印模式调试：单向打印，150DPI，每行固定行进 24,000 个编码条脉冲。即 $\theta_g = 24000$ 。这里选择 $\theta_{g1} = 2000$ ， $\theta_{g2} = 20000$ ， $\theta_{g3} = 2000$ 。根据这一试凑来计算相应的 θ_{g_end} ， a ， V_{\max} 。基本原则如下：

系统的采样周期是：50ms，字车匀速阶段行进速度为：100mm/s。加速度为：100mm/s²，折合电机轴为：3.2 转/s²。150DPI 相当于每两个打印点之间是 25.4mm/150=0.169mm。所以两点之间的时间间隔是 0.169/100=1.69×10⁻³s。编码条输出信号周期 $T = 1.69 \times 10^{-3}$ s。把编码条脉冲数折算到电机轴上：电机轴皮带轮直径为 10mm。则电机轴每转产生的脉冲数为： $K_p = 150/25.4 \times \pi \times 10 = 185$ 脉冲/转。字车运行时每秒产生的脉冲数：3.2×185=592 脉冲/s。

匀速区用脉冲表示的速度是：

$$V = 592 \times 50 \times 10^{-3} = 29.6 \text{ 脉冲/T.}$$

用脉冲数表示的加速度是：

$$A = K_p a T^2 = 185 \times 3.2 \times (50 \times 10^{-3})^2 = 1.5 \text{ (脉冲/T}^2\text{)}.$$

在匀加速区，第 K 个采样周期的转速

$$V_k = A \times 1 + V_{k-1} = A \times 1 + A \times 1 + V_{k-2} = AK = 1.5K \text{ (脉冲/T)}.$$

第 K 个采样周期内递增的速度为：

$$\Delta V_k = V_k - V_{k-1} = A = 1.5 \text{ 脉冲/T.}$$

经过以上计算，在匀加速区，每个采样周期增加 1.5 个脉冲当量。在匀减速区每个采样周期减少 1.5 个脉冲当量。生成 SCP 曲线后，电机的控制由 PID 环节来实现。下面对直流电机调速系统做一分析。

3.3.2 直流电机调速系统

直流电机调速系统主要包括直流电机数学模型的建立、电机闭环调速。

3.3.2.1 直流电机数学模型的建立

直流电动机作为控制系统的元件，经常用图 3-24 所示的符号表示。电枢以速度 ω 驱动负载旋转。电枢电路由电枢电阻 R_a 和电枢电感 L_a 组成。电压 V_b 是由

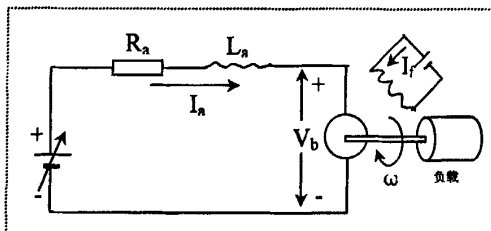


图 3-24. 直流电动机符号表示法

Fig.3-24. the symbol of DC motor

电动机的发电机特性产生的。当电枢在磁场中旋转时，电枢绕组中将产生与直流测速发电机相同的感应电压。感应电压 V_b 与外加电压 V_a 极性相反，因此称为反电势。它通过反电势系数 C_e 与电机转速成正比， $V_b = C_e \omega$ 。在外加电压 V_a 的作用下，电动机电枢回路电压平衡方程如式 3-1 所示

$$L_a \frac{dI_a}{dt} + R_a I_a = V_a - C_e \omega \quad (3-1)$$

电动机产生的磁力矩与电枢电流成正比，比例系数 C_m 叫做电磁力矩系数。电磁力矩用来驱动负载和克服干扰力矩。因此，电动机上的力矩平衡方程为

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_m I_a - M_d \quad (3-2)$$

式 3-2 中， J 表示折合到电动机轴上的转动惯量， M_d 表示负载力矩及干扰力矩的总和。

方程 3-1 和 3-2 组成了直流电机的数学模型。现将它们进行拉氏变换后可得

$$(L_a s + R_a) I_a s = V_a s - C_e \omega(s) \quad (3-3)$$

$$Js\omega(s) = C_m I_a(s) - M_a(s) \quad (3-4)$$

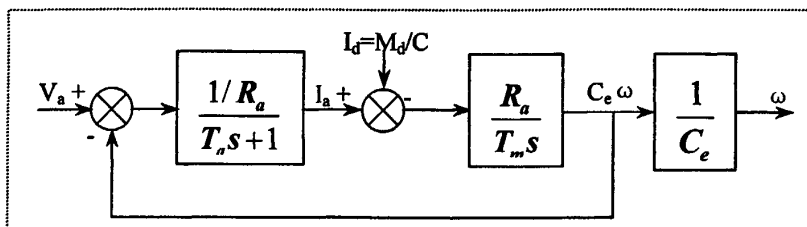


图 3-25. 直流电机数学模型传递函数方块图

Fig.3-25.the block diagram of DC motor's transfer

根据方程 3-3 和 3-4 可画出直流电机传递函数方块图, 如图 3-25 所示。图中, $T_a = L_a / R_a$ 为电动机电气时间常数; $T_m = J R_a / C_e C_m$, 电动机机电时间常数。根据方块图算出其传递函数

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{1/C_e}{T_m T_a s^2 + T_m s + 1} \quad (3-5)$$

为一二阶系统。

3.3.2.2 直流电机速度闭环调速模型的建立

系统采用的调速系统是速度闭环调速系统。系统方块图如图 3-26 所示。

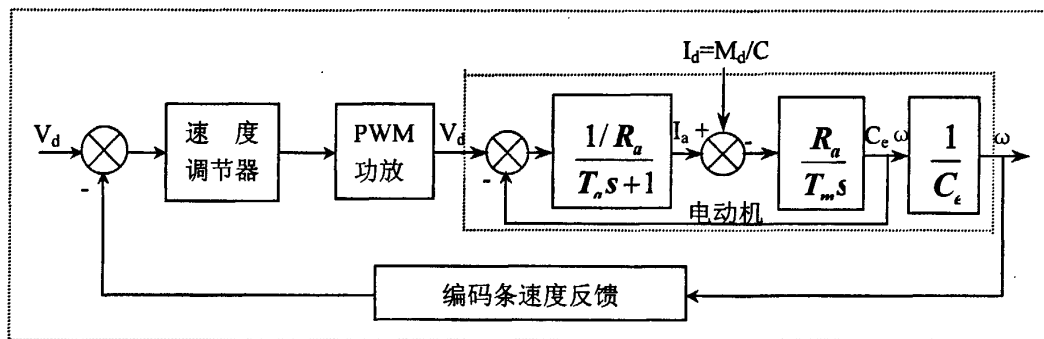


图 3-26. 速度闭环调速系统方块图

Fig.3-26.the block diagram of speed closed-loop

PWM 功放模块模型

PWM（脉宽调制）是由 DSP 硬件产生的，即利用锯齿波发生器产生的信号和直流控制电压比较，产生具有一定占空比的方波波形。比较过程由 DSP 内部

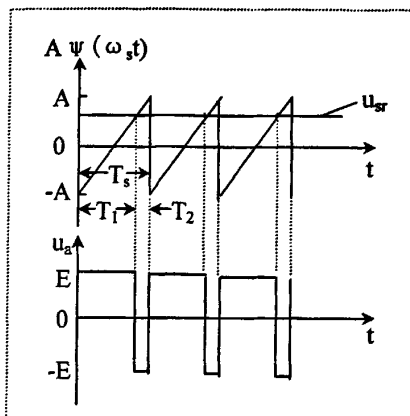


图 3-27. 脉宽调制波形图

Fig.3-27.the figure of PWM

的定时器控制，通过调节定时器的参数可改变 PWM 波形的占空比和周期。波形如图 3-27 所示。

图中 $A\psi(\omega_s t)$ 为高频锯齿波（频率在几百赫兹到几兆赫兹之间，这和 DSP 定时器的有关）， u_{sr} 为控制用直流电压。有效的电枢电压应为 u_a 的平均值 V_{dc} ,

$$V_{dc} = \frac{1}{T_s} \left\{ \int_0^{T_1} E dt - \int_{T_1}^{T_1+T_2} E dt \right\} = \frac{E}{T_s} (T_1 - T_2) \quad (3-6)$$

其中

$$T_1 = T_s (1 + u_{sr} / A) / 2, \quad T_2 = T_s (1 - u_{sr} / A) / 2 \quad (3-7)$$

所以 $V_{dc} = Eu_{sr} / A$ ，此等式表明，PWM 功放在建模时可采用纯增益建模。

速度调节器模块

PID 调节简单实用，在实际工程中有很高的实用价值。本系统中速度调节器也正是采用了这种简单有效的 PID 控制器。主要因为其有以下几方面的优点：

- (1) PID 各参数相互独立，调整简单，控制鲁棒性好；
- (2) 算法简单，计算量小，易实现多回路控制；
- (3) PID 调节技术发展相对成熟，有许多经验可以借鉴；

PID 控制，就是比例（Proportional）、积分(Integral)以及微分(Differential)控制。控制系统结构图如图 3-28 所示。其输出与输入之间是比例-积分-微分的关

系，即：

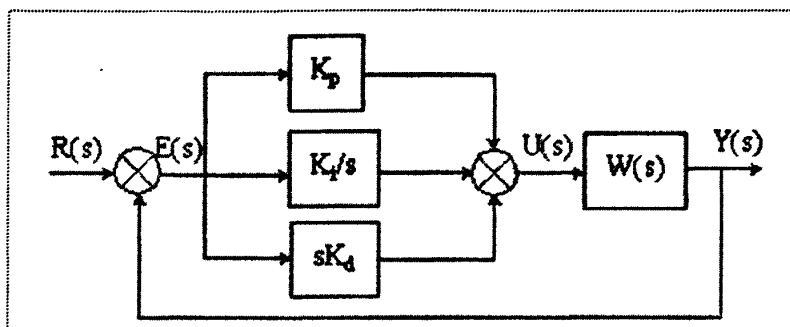


图 3-28. PID 控制系统框图

Fig.3-28.the block diagram of PID control

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3-8)$$

写成传递函数的形式表示为：

$$D(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s \quad (3-9)$$

式中 T_i 为积分时间常数， T_d 为微分时间常数， $K_i = K_p / T_i$ 称为积分系数，

$K_d = K_p T_d$ 称为微分系数。

在计算机控制系统中，为了减少系统的计算量和存储量，常采用增量式 PID 表示：

$$\begin{aligned} u(k) &= \Delta u(k) + u(k-1) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) \\ &\quad + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] + u(k-1) \\ &= K_p e_c(k) + K_i e(k) + K_d [e_c(k) - e_c(k-1)] + u(k-1) \end{aligned} \quad (3-10)$$

其中： $u(k)$ 为第 k 次控制时控制器的输出；

$e(k)$ 为第 k 次控制时的偏差信号；

$K_p(k)$ 为第 k 次控制时控制器的比例系数；

$K_i(k)$ 为第 k 次控制时控制器的积分系数；

$K_d(k)$ 为第 k 次控制时控制器的微分系数；

$u(k-1)$ 为第 k 次控制时控制器的积分累积量，即 $u(k-1) = \sum_{j=1}^{k-1} K_i(j)e(j)$ 。

接下来讨论 PID 控制参数（即比例系数 K_p ，积分时间常数 T_i 和微分时间常数 T_d ）对系统性能的影响。

(1) 比例控制 K_p 对系统性能的影响

对于动态特性, 当比例控制作用增大时, 系统动作灵敏, 响应速度较快; 比例作用偏大时, 系统振荡次数增加, 调节时间过长, 即 K_p 过大时, 系统将趋于不稳定; 在系统稳定的情况下, 加大比例控制 K_p , 可以减少稳态误差, 提高控制精度, 但不能完全消除静态误差。

(2) 积分控制 T_i 对系统性能的影响

积分控制通常与比例控制或微分控制一起构成 PI 控制器或 PID 控制器。动态过程中, T_i 通常使系统的稳定性下降。 T_i 太小时, 系统不稳定; T_i 偏小, 振荡次数 T_i 较多。对于稳态, 积分控制 T_i 能消除系统的稳态误差, 提高控制系统的精度。

(3) 微分控制 T_d 对系统性能的影响

和积分控制一样, 微分控制通常也不会单独使用。微分控制可以改善系统的动态特性 (如超调量减少, 调节时间缩短), 当 T_d 偏大或偏小时, 超调量会比较大, 调节时间也较长。只有当 T_d 合适时, 才可以得到比较好的特性。

根据上述特性, 希望速度不要发生快速波动, 使稳态速度误差为零, 本系统中速度调节器采用 PI 控制器。传递函数为

$$G_n(s) = K_p(1 + 1/T_i s) \quad (3-11)$$

速度负反馈模块

系统的速度反馈是靠编码条输出信号, 并由 DSP 进行采集来实现的。DSP

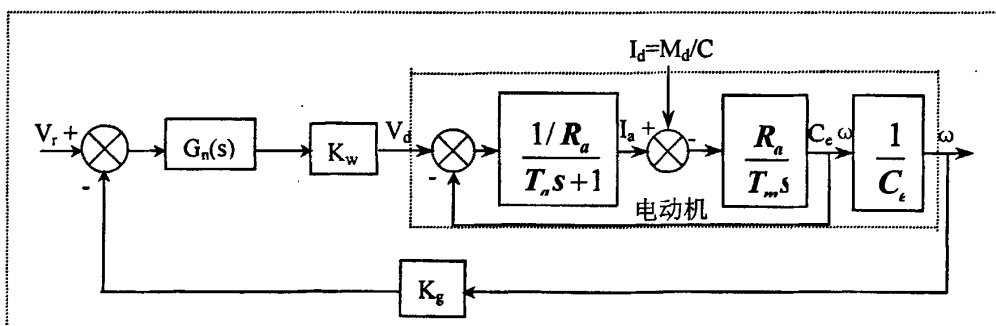


图 3-29. 速度负反馈闭环调速系统传递函数方块图

Fig3-29.the block diagram of speed closed-loop system

将测量编码条输出的脉冲数。由直流测速电机的原理, 速度负反馈乘上速度-电势转换系数 K_g 即可。

现在不难得出速度负反馈闭环传递函数的方块图, 如图 3-29 所示。

由图 3-29 计算出系统的传递函数为

$$\frac{\omega(s)}{V_r(s)} = \frac{G_n(s)K_w}{C_e T_a T_m s^2 + C_e T_m s + C_e + G_n(s)K_w K_g} \quad (3-12)$$

将式 3-11 代入 3-12 可得

$$\frac{\omega(s)}{V_r(s)} = \frac{K_p K_w s + K_w K_p / T_i}{T_a T_m C_e s^3 + C_e T_m s^2 + (C_e + K_p K_w K_g) s + K_w K_p K_g / T_i} \quad (3-13)$$

为一三阶系统。

3.3.2.3 直流调速系统动态性能分析

已经得到了速度闭环负反馈调速系统的数学模型, 现在结合字车直流电机的技术参数, 建立字车电机调速的模型。

3.3.2.4 字车直流调速系统中各特性参数的确定

字车电机采用的是美国 PITTMAN 公司生产的 PITTMAN LO-COG 型直流伺服电机。该公司提供的电机具体参数见表 3-3。测得字车质量为 0.5Kg (包括坦克链等附件的质量)。电机轴端的皮带轮直径为 10.0mm。考虑到电机转子本身的转动惯量。将这些折算到电机轴上的转动惯量 J 约为 $1 \times 10^{-4} \text{kgm}^2$ 。根据经验公式计算得电动机电气时间常数 $T_a = 0.825 \text{mH} / \Omega$, 机电时间常数 $T_m = 2.29 \times 10^{-2} (\text{kgmA} \cdot \Omega \text{rad/s}) / (\text{NV})$ 。速度反馈系数 K_g 为 0.25V/rad/s , PWM 功放模块增益 $K_w = 2.4$ 。进入 PI 控制器的整定过程。将以上数据代入式 3-5 可得出电机模型的传递函数为

$$\frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{1}{0.006s^2 + 0.006s + 0.00287} \quad (3-14)$$

采用经典的齐格勒-尼柯尔 (Ziegler-Nichols) 的第一种方法设定参数。也就是只对控制对象——直流电机进行单位阶跃响应, 根据响应曲线计算 PI 控制器的参数。利用 matlab 软件对其进行仿真。得到的曲线为一 S 形曲线, 通过 S 形曲线的转折点画曲线的切线。按图 3-30 所示求出 L 和 T 的大小, 图中 $L=0.4$, $T=3.9$ 。根据 Ziegler-Nichols 法则的规定, PI 控制器中控制参数初步可定为 $K_p = 0.9 \times kL/T = 0.9 \times 350 \times 0.4/3.9 \approx 32$, $T_i = 3.3L = 3.3 \times 0.4 \approx 1.32$ 。

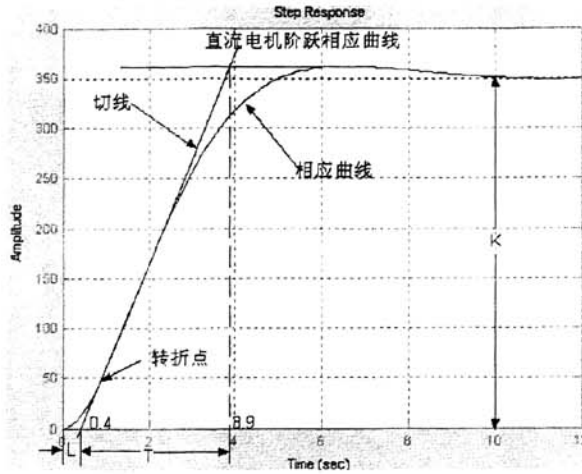


图 3-30. 字车直流电机模型阶跃相应模型

Fig3-30. the curve of motor module step response

现在有关速度负反馈直流调速系统数学模型的所有参数已经全部得到。将所求得的参数代入式 (3-13) 得传递函数的数学表达式为

$$\frac{\omega(s)}{V_r(s)} = \frac{76.8s + 58.2}{0.0066s^3 + 0.0066s^2 + 47.9s + 14.5} \quad (3-15)$$

3.3.2.5 PI 调节器构成的速度负反馈调速系统的调速过程

下面主要讨论一下其具体调速过程。

启动时, 突然加一个给定电压 V_d , 因为电动机转速没有来得及响应, 转速反馈电压 E_g 很小, PI 调节器的输入电压瞬时达到较大, 调节器的输出电压一开始就达到较大值, 这样在转速没有升上来之前, 迅速产生一个较大的电枢冲击电流, 使电机转速迅速升高, 较快地完成启动过程。

当系统要减速制动时, 这样 PI 调节器输入电压与开始时方向相反, 其立即输出反向电压。对于不可逆调速系统而言, 系统将慢慢依靠负载转矩自由制动。

系统稳定运行时, PI 调节器输入电压为零, 同样输出电压也为零。在外界条件不变的情况下, 电机将以恒定的速度运行。

启动过程和减速制动过程, 都是在改变给定输入信号时引起的动态过程。在外界因素作用下引起扰动时, 系统的调速过程又是怎样的呢?

设系统的外力矩突然变大, 电动机力矩来不及跟随负载力矩的变化, 电动机转动部分便失去平衡。根据动力学方程

$$M - M_L = J\varepsilon = J \frac{d\omega}{dt} < 0 \quad (3-16)$$

如果引起转速下降, E_g 跟着下降, 调节器的输入电压不等于零。经过调节作用, 使调节器输出升高, 电动机电枢电流增大, 最后达到电动机转矩 M 与负载转矩的重新相等, 转速也回升到原来的数值。实验证明电机调速性能良好, 位置控制精确。位置伺服控制达到了预定目标。

3.4. 进纸步进电机的控制要求及运行结果

鉴于目前的调试阶段, 进纸步进电机的控制, 保证两行的打印不出现重叠即可。并没有考虑纵向分辨率的要求。控制相对比较简单。每次进纸操作 DSP 向步进电机驱动器发送固定的 800 个脉冲。进纸系统组成框图见图 3-31 所示。

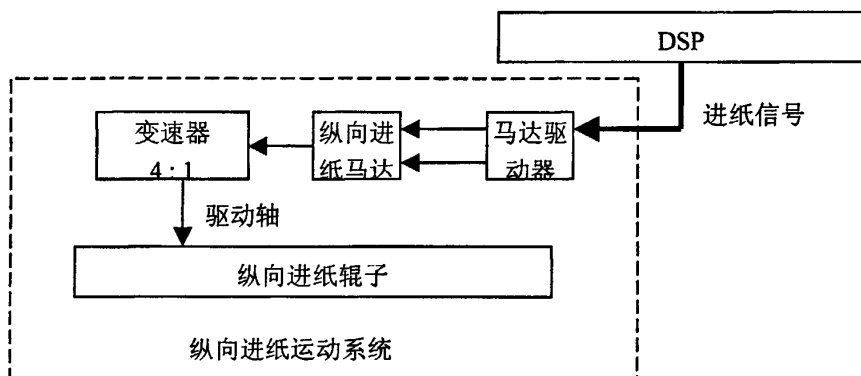


图 3-31. 进纸系统结构示意图

Fig3-31. paper feeding system

以下将对电机的转矩及工作频率进行验算。

打印机的负载转矩主要是辊子转动的摩擦力。纵向运动系统有 1 个辊子。辊子的半径为 3cm, 长度为 2m, 材料为铝合金, 使用滚珠轴承 (假设合摩擦系数为 0.01)。又假定媒介的质量为 200kg。则摩擦转矩为:

$$M_f = 0.01 \times (1 \times 9.8 \times \pi \times 0.03^2 \times 2 \times 2.5 \times 10^3 + 200 \times 9.8) \times 0.03 \\ \approx 0.63 \text{ Nm}$$

为了使步进电机正常运行 (不失步、不越步), 正常启动并满足对转速的要求, 启动力矩选取为:

$$M_g \geq M_{L0} / (0.3 - 0.5)$$

式中: M_g ——电机启动力矩;

M_{L0} ——电机静负载力矩;

$$M_{L0} = M_{\max} + M_f;$$

式中: M_{\max} ——快速空载启动时折算到电机轴上的加速度力矩;

M_f ——折算到电机轴上的摩擦力矩。(可忽略不计);

步进电机易于启动, 停止, 正反转及变速, 能组成具有一定精度的开环控制

系统, 整个系统简单廉价。因此设计中选用了步进伺服方式对进纸部分进行位置控制。实验结果表明控制方案是可行的。

3.5 小结

本章论述了运动控制系统的结构, 任务和具体实现方法。文中采用了基于 DSP 进行运动控制系统的实现方案。设计中体现了 DSP 控制系统接口能力强, CPU 性能高, 软硬件资源丰富的特点。

运动控制前向通道的设计充分利用了 DSP 芯片内的接口资源, 简化了接口电路的设计。这对提高运动控制系统的精度起到了很大作用。运动控制后向通道的设计都采用了电机控制专用集成电路。L297, L298 等芯片的应用使系统硬件更简单, 更紧凑。同时也提高了系统运行的可靠性。

字车直流电机要求精确的位置控制, 同时要求电机运行平稳。文中采用位置闭环的方式达到了这一要求。使电机按照梯形曲线进行运转, 完成匀加速运行阶段, 匀速运行阶段和匀减速运行阶段。最终电机将带动字车停靠在预定位置。保证了打印的横向精度。

进纸步进电机由于很难获得进纸的具体位移, 因而, 采用了开环步进电机的控制方式。DSP 向驱动器发送的脉冲数与每次打印的纵向进给有一确定的对应关系。这一关系决定了打印的 PASS 数, 单向, 双向打印模式等喷绘机的工作状态。

实验证明采用本文的方案设计的喷绘机运动控制系统, 具有控制精度高, 系统可扩展性强等特点。为喷绘机运动控制提出了一个很好的解决方案。

第四章 打印头控制系统

打印头是把与打印数据相对应的电信号转化为打印喷墨动作的最终执行部件。对打印头的控制是打印操作数据通道的重要组成部分。打印数据按照要求的时序送到打印头后,打印头将以此进行打印操作。因此打印头的控制将直接影响打印分辨率,打印速度等喷绘机关键性能指标。

4.1. 打印头简介

我们使用的打印头是英国 XAAR 公司生产的打印头。该打印头主要有以下几部分组成:

Connector: 提供了打印头与外部控制器的电气接口;

Frame: 提供打印头机械安装方式,这部分除方便打印头机械安装提供外,还起到了打印工作时冷却打印头的作用;

Cap assembly: 用于保护打印头的内部电路元件及喷墨压电元件的外壳;

Nozzle plate: 喷孔平面(128个喷孔“一”字分布在这个平面上);

Temperature sensor: 在打印头内部,外部以此传感器的输出信号在打印时对打印头进行温度补偿;

Actuator: 在打印头内部,它由相互平行的墨水通道组成。将控制打印头工作的电信号转化到喷墨动作所需的压力以挤压墨水进行喷墨。这部分的动作决定了打印头喷墨的墨滴形状;

Driver chip: 在打印头内部的控制芯片,由它来控制送到 Actuator 的打印波形形状。在上电后对 Driver chip 进行数据加载即 Configuration 的过程。这一过程在每次打印头上电时便进行一次。Configuration 过程的正确执行是打印头正常工作的关键。整个 Configuration 过程由 1020 个 16 进制数的加载构成;

Filter: 在打印头内部,功能是防止打印头墨水通道堵塞。是由 9 μ s 孔径的不锈钢细网做成的;

该打印头的主要优点是:

1. 工作速度快:可以 660mm/s 的速度进行打印,并达到 38 sq. metres per hour 的打印速度;

2. 改进的逻辑设计,以广泛适应不同墨水的特性;

3. 结构设计更为合理,安装方便;

打印头 **Connector** 提供了对外的 30PIN 电气接口。外部的打印头控制系统的设计将按照这些信号进行。理解这些信号的电气特性,时序要求等是打印头控制系统设计的出发点。

部分接口信号的解释:

1. DATA_nCONFIG: 输出。打印数据和配置数据指示。1: 打印数据; 0: 配置数据;

2.CYCLESTB1 and CYCLESTB2: 输入。打印触发脉冲。一个打印操作需要 3 个连续的 CYCLESTB1 信号。即一个打印操作包括 A,B,C 三相 CYCLESTB1 信号分别对应一个打印头里 $3n+1, 3n+2, 3n+3$ 个喷嘴的喷射动作。CYCLESTB2 在 XJ126R 打印头中没有定义, 需接地;

3. DI0,DI1,DI2,DI3: 输入。打印头数据输入线。加载配置数据时 DI0,DI1,DI2,DI3 四位同时并行向打印头输入加载数据。正常打印时, 只使用 DI3 向打印头串行输入打印数据。这时 DI0,DI1,DI2 需保持低电平不变;

4. DSTB: 输入。加载数据时钟。是在加载配置数据和打印数据时的同步时钟。数据在 DSTB 的上升沿进入打印头内部的移位寄存器。在 DSTB 的下降沿从打印头内部移位寄存器移出;

4.2. 打印头的时序控制

打印头工作的关键是按照其技术文档中的电气, 时序等说明, 来实现控制时序。以使打印头能正常工作。打印头控制系统可分为两部分:

1. 打印数据缓冲;
2. 打印时序生成;

从实现打印的功能来看, 打印操作具体来讲是一个数据缓冲和传输的过程。其中需要大量的时序和逻辑操作。以 FPGA, CPLD 为代表的可编程逻辑器件是实现这类功能的最佳选择。

4.2.1. 可编程逻辑器件及 VHDL 语言简介

4.2.1.1 可编程器件简介^[6]

当今社会是数字化的社会, 数字集成电路本身在不断地进行更新换代。它由早期的电子管、晶体管、小中规模集成电路、发展到超大规模集成电路(VLSIC, 几万门以上)以及许多具有特定功能的专用集成电路。但是, 随着微电子技术的发展, 设计与制造集成电路的任务已不完全由半导体厂商来独立承担。系统设计师们更愿意自己设计专用集成电路(ASIC)芯片, 而且希望 ASIC 的设计周期尽可能短, 最好是在实验室里就能设计出合适的 ASIC 芯片, 并且立即投入实际应用之中, 因而出现了现场可编程逻辑器件(FPLD), 其中应用最广泛的当属现场可编程门阵列(FPGA)和复杂可编程逻辑器件(CPLD)。

早期的可编程逻辑器件只有可编程只读存储器(PROM)、紫外线可擦除只读存储器(EPROM)和电可擦除只读存储器(EEPROM)三种。由于结构的限制, 它们只能完成简单的数字逻辑功能。

其后, 出现了一类结构上稍复杂的可编程芯片, 即可编程逻辑器件(PLD),

它能够完成各种数字逻辑功能。典型的 PLD 由一个“与”门和一个“或”门阵列组成，而任意一个组合逻辑都可以用“与-或”表达式来描述，所以，PLD 能以乘积和的形式完成大量的组合逻辑功能。

这一阶段的产品主要有 PAL(可编程阵列逻辑)和 GAL(通用阵列逻辑)。PAL 由一个可编程的“与”平面和一个固定的“或”平面构成，或门的输出可以通过触发器有选择地被置为寄存状态。PAL 器件是现场可编程的，它的实现工艺有反熔丝技术、EPROM 技术和 EEPROM 技术。还有一类结构更为灵活的逻辑器件是可编程逻辑阵列(PLA)，它也由一个“与”平面和一个“或”平面构成，但是这两个平面的连接关系是可编程的。PLA 器件既有现场可编程的，也有掩膜可编程的。在 PAL 的基础上，又发展了一种通用阵列逻辑 GAL (Generic Array Logic)，如 GAL16V8, GAL22V10 等。它采用了 EEPROM 工艺，实现了电可擦除、电可改写，其输出结构是可编程的逻辑宏单元，因而它的设计具有很强的灵活性，至今仍有许多人使用。这些早期的 PLD 器件的一个共同特点是可以实现速度特性较好的逻辑功能，但其过于简单的结构也使它们只能实现规模较小的电路。

为了弥补这一缺陷，20 世纪 80 年代中期。Altera 和 Xilinx 分别推出了类似于 PAL 结构的扩展型 CPLD(Complex Programmable Logic Device)和与标准门阵列类似的 FPGA(Field Programmable Gate Array)，它们都具有体系结构和逻辑单元灵活、集成度高以及适用范围宽等特点。这两种器件兼容了 PLD 和通用门阵列的优点，可实现较大规模的电路，编程也很灵活。与门阵列等其它 ASIC(Application Specific IC)相比，它们又具有设计开发周期短、设计制造成本低、开发工具先进、标准产品无需测试、质量稳定以及可实时在线检验等优点，因此被广泛应用于产品的原型设计和产品生产(一般在 10,000 件以下)之中。几乎所有应用门阵列、PLD 和中小规模通用数字集成电路的场合均可应用 FPGA 和 CPLD 器件。

FPGA(现场可编程门阵列)与 CPLD(复杂可编程逻辑器件)都是可编程逻辑器件，它们是在 PAL, GAL 等逻辑器件的基础之上发展起来的。同以往的 PAL, GAL 等相比较，FPGA / CPLD 的规模比较大，它可以替代几十甚至几千块通用 IC 芯片。这样的 FPGA / CPLD 实际上就是一个子系统部件。这种芯片受到世界范围内电子工程设计人员的广泛关注和普遍欢迎。

尽管 FPGA, CPLD 和其它类型 PLD 的结构各有其特点和长处，但概括起来，它们是由三大部分组成的。

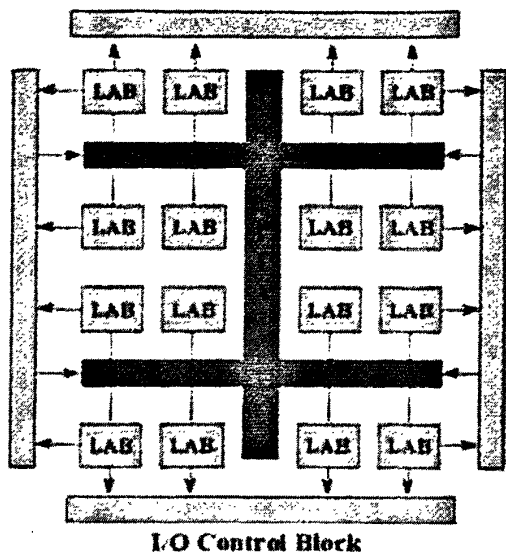


图 4-1. PLD 内部结构

Fig. 4-1 PLD structure inside the chip

大，其单片逻辑门数已达到上百万门，它所能实现的功能也越来越强，同时也可以实现系统集成。

用户可以反复地编程、擦除、使用或者在外围电路不动的情况下用不同软件就可实现不同的功能。FPGA / CPLD 软件包中有各种输入工具和仿真工具等。

4.2.1.2 可编程器件的开发过程

以 FPGA 为例，它的开发流程见图 4-2 所示：首先进行的是建立系统模型，这一设计阶段主要完成数字系统功能设计，并划分成功能相对独立，接口合理，方便的模块。系统模型建立的正确，合理对这个设计是至关重要的，有时在设计后期发现系统模型不合理，也需对其进行修改。接着是进行 VHDL 代码的编写。VHDL 代码将把模型具体地用硬件描述语言进行描述。代码经过编译后即进行行为级仿真。行为级仿真主要验证系统功能的正确与否，这时硬件门延时等因素将不会体现出来。仿真结果如果不正确将返回进行代码修改，如正确，便进入系统综合，综合就是把设计抽象层次中的一种表示转化成另一种表示的过程。综合器的好坏将影响随之进行的布局，布线操作。最终影响芯片的性能。下一步要进行的是布局后仿真，这是下载芯片之前的最后一次仿真，也是最重要的一次仿真。仿真的结果将反映真实的硬件特性如延时等。一般来讲，仿真结果与实际运行是一致的。如果仿真结果不正确，则需返回必要的前面的设计阶段进行修改，反复进行直至仿真结果的正确。通过了布局后仿真，就可以进行芯片下载了。让芯片独立上电独立运行。我们使用的是 Xilinx 公司的芯片。以上的操作都在集成开发环境 IDE PROJECTS NAVIGATOR4.2 中进行。使整个设计过程方便而高

一个二维的逻辑块阵列，构成了 PLD 器件的逻辑组成核心。

输入 / 输出块：连接逻辑块的互连资源。

连线资源：由各种长度的连线线段组成，其中也有一些可编程的连接开关，它们用于逻辑块之间、逻辑块与输入 / 输出块之间的连接。

典型的 PLD 的框图见图 4-1 所示。

随着 VLSI (Very Large Scale IC, 超大规模集成电路) 工艺的不断提高单一芯片内部可以容纳上百万个晶体管，FPGA / CPLD 芯片的规模也越来越

效。

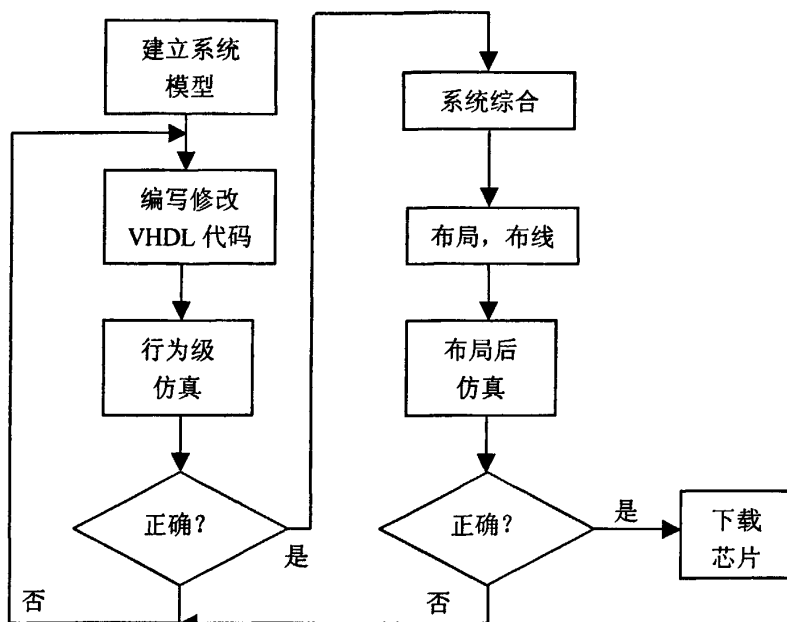


图 4-2. FPGA 的开发流程

Fig. 4-2 Design flow of FPGA

4.2.1.3 VHDL 语言简介^[7]

VHDL 的英文全名是 Very-High-Speed Integrated Circuit HardwareDescription Language 诞生于 1982 年。1987 年底, VHDL 被 IEEE 和美国国防部确认为标准硬件描述语言。自 IEEE 公布了 VHDL 的标准版本, IEEE-1076 (简称 87 版) 之后, 各 EDA 公司相继推出了自己的 VHDL 设计环境, 或宣布自己的设计工具可以和 VHDL 接口。此后 VHDL 在电子设计领域得到了广泛的接受, 并逐步取代了原有的非标准的硬件描述语言。1993 年, IEEE 对 VHDL 进行了修订, 从更高的抽象层次和系统描述能力上扩展 VHDL 的内容, 公布了新版本的 VHDL, 即 IEEE 标准的 1076-1993 版本, (简称 93 版)。现在, VHDL 和 Verilog 作为 IEEE 的工业标准硬件描述语言, 又得到众多 EDA 公司的支持, 在电子工程领域, 已成为事实上的通用硬件描述语言。

VHDL 主要用于描述数字系统的结构, 行为, 功能和接口。VHDL 的程序结构特点是将一项工程设计, 或称设计实体 (可以是一个元件, 一个电路模块或一个系统) 分成外部 (或称可是部分, 及端口) 和内部 (或称不可视部分), 即涉及实体的内部功能和算法完成部分。在对一个设计实体定义了外部界面后, 一旦其内部开发完成后, 其他的设计就可以直接调用这个实体。这种将设计实体分成内外部分的概念是 VHDL 系统设计的基本点。应用 VHDL 进行工程设计的优点是多方面的。

1. 与其他的硬件描述语言相比, VHDL 具有更强的行为描述能力, 从而决定了它成为系统设计领域最佳的硬件描述语言;
2. VHDL 丰富的仿真语句和库函数; VHDL 语句的行为描述能力和程序结构决定了它具有支持大规模设计的分解和已有设计的再利用功能;
3. 对于用 VHDL 完成的一个确定的设计, 可以利用 EDA 工具进行逻辑综合和优化, 并自动的把 VHDL 描述设计转变成门级网表; VHDL 对设计的描述具有相对独立性, 设计者可以不懂硬件的结构, 也不必管理最终设计实现的目标器件是什么, 而进行独立的设计;

自顶向下 (TOP DOWN) 的层次化设计方法

现代数字电路设计广泛, 深刻地体现了抽象层次概念。抽象层次^[7]可以在以下两个域中表示:

结构域: 在结构域中, 一个部件通过一些基本部件的互连来描述;

行为域: 在行为域中, 一个部件通过定义它的输入/输出相应来描述;

抽象层次的定义如下:

抽象层次: 一系列相关的表示层次, 允许以不同的细节程度来描述一个系统。一个典型的抽象层次如图 4-3 所示, 层次中的第 i 层可以转换成第 $i+1$ 层, 细

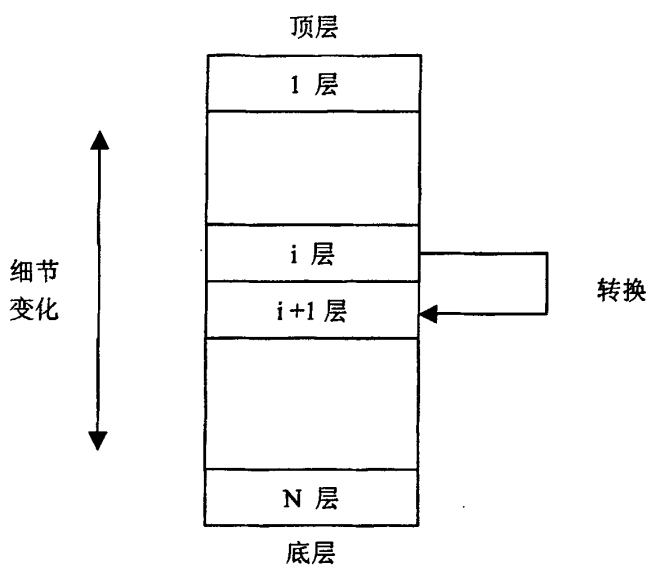


图 4-3. 抽象层次

Fig. 4-3. abstract level

节程度一般随层次的下降而单调增加。

4.2.2 打印数据缓存

喷绘机的正常工作有赖于打印数据通道和控制通道的建立。其中打印数据通道的结构示意图如图 4-4 所示。

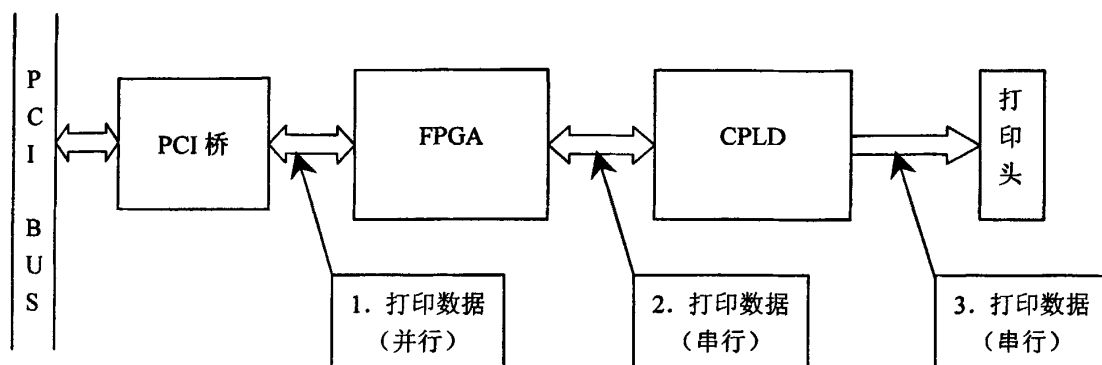


图 4-4. 打印数据通道结构示意图

Fig. 4-4. printing data channel structure

打印数据是通过主控计算机的 PCI 总线获得的，数据传输的带宽是高速，高质量打印的关键因素之一。PCI 总线可实现 133MHz 的总线带宽。如图 4-4 所示。PCI 桥芯片实现了 PCI 的通讯协议。PCI 桥与 FPGA 之间由数据，地址，控制三总线进行连接。这样打印数据就从主控计算机传到了 FPGA 内部。CPLD 对打印头进行完配置数据加载 (Configuration) 后，将打印头的控制权交给 PCI 卡上的 FPGA。再由 FPGA 直接面向打印头实施打印操作。打印头的工作需要一组有严格时序要求的信号送入打印头。

FPGA 从 PCI BUS (PCI 桥芯片) 获得打印数据，即 1. 打印数据 (并行)。这里的数据是经过主控计算机处理过并下传的打印数据。CPLD 在加载完配置数据后，即在其内部为打印数据建立数据通道。如图 4-4 所表示的 2. 打印数据 → 3. 打印数据。通道可对一些传输质量不好的信号进行整形处理，之后打印数据进入打印头。

FPGA 是实现打印这一数字系统的核心部件，其内部的功能结构见图 4-5 所示。

从图中便可看出系统的模块化设计思想。整个系统按功能划分为 6 个模块，各个模块的规模、工作量也是不同的，每个模块包含若干个 PROCESS，以实现不同的功能。它们之间按定义的接口进行连接，这些连接被定义为 FPGA 内部的信号。下面依次介绍各个模块：

1. 4 个打印头的的数据缓存模块。打印数据从 PCI 总线接收，并最终送往打印头。两面的数据流量，方式都有很大差异。PCI 是高性能的并行总线标准。其峰值传输带宽可达到 133MHz。送往打印头的数据是串行进入打印头的。而且传输的速率要远低于 PCI 总线的传输速率。另一方面，主控计算机不可能通过 PCI 总线实时向打印头传送打印数据。因此，合理的解决方案是设立打印数据缓存，

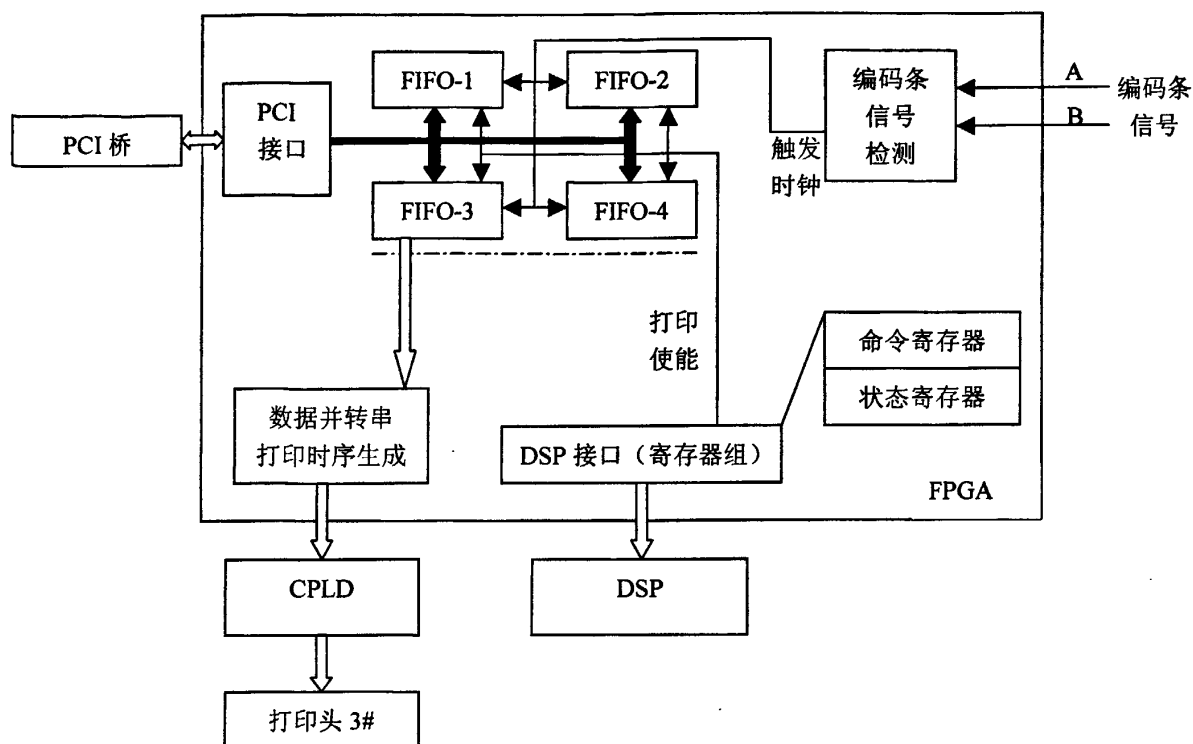


图 4-5. FPGA 内部功能结构示意图

Fig. 4-5. FPGA function structure

实现一次填满缓冲区，实施一段时间的打印。数据缓存采用的是先进先出堆栈FIFO的结构。FIFO的具体操作见FIFO简介；

2. 打印数据并转串。在FPGA内部打印数据在FIFO的出口处是16位的并行信号。这些16位的并行信号将以串行的方式送往打印头。因此，需要进行数据并转串的过程。转换的结果是要让送往打印头的数据符合打印头时序说明文档；

3. 编码条信号的检测。由于打印是严格按位置进行的，位置信息由铺设在轨道上的编码条传感器得到。位置信号是触发打印操作的触发信号。FPGA内部通过对位置信号的检测可实现150DPI和600DPI两种打印模式；

4. 打印头控制时序生成。送往打印头的信号除了打印数据以外，还有数据加载时钟，打印信号，同步时钟。打印方向信号等。这些信号必须同打印数据按时序要求一同送往打印头，这样打印头才能正常工作。整个打印时序的生成是在FPGA内部完成的。（图中以3#打印头为例，其对应的是3#FIFO。其余打印头类似。）；

5. 与DSP的接口。PCI控制卡上的DSP芯片主要完成的是运动控制任务。DSP是系统控制通道的核心。DSP在处理运动控制任务的同时还承担者向FPGA

发送打印命令，从 FPGA 读出打印状态的任务。为此，FPGA 内部要有能与 DSP 进行通讯的模块。该模块，按照 DSP I/O 空间的读写时序要求，完成与 DSP 的通讯。这一部分详见 4.3 运动控制系统与打印头控制系统的连接一节；

6. 与 PCI 桥芯片的接口。PCI 桥芯片 PLX9054 实现复杂的 PCI 通讯协议。通过桥芯片，使 FPGA 直接面向打印数据进行操作。避免了实现复杂的 PCI 协议的工作。使设计简化。所以 FPGA 内需要有实现这一功能的模块。

FIFO

按照打印头编号(1-4)在 FPGA 内进行 FIFO 缓存。FIFO 的参数是 16×256 。

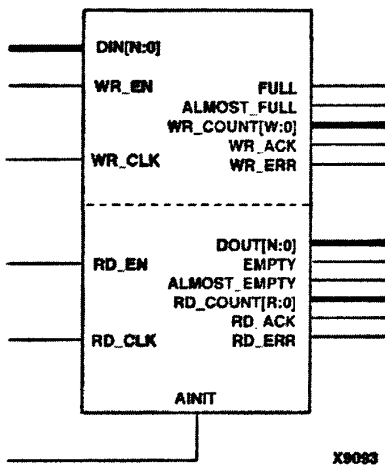


图 4-6. FIFO 接口信号示意图

Fig. 4-6. FIFO signals for interface

即宽度是 16BITS，深度是 256BITS。FPGA 内部由这样 4 个 FIFO 以实现打印数据的缓存。由于主控计算机使用的是 WINDOWS NT 4.0 操作系统不是一个实时操作系统。而打印机工作时必须保证有连续的打印数据下传到打印头上，否则将出现打印数据断档的情况。这是不允许的。因此在 PCI 控制卡的 FPGA 内设置 FIFO 的结构。以实现非实时操作系统下建立实时数据通道的目的。

FIFO 是一种先入先出(First In First Out)的数据结构。这样的数据结构使 FIFO 广泛地应用于数据缓存等场合。以实现接口两端不同传输速率间的匹配。另外，FIFO

有相应的控制，状态引线以方便地进行控制，监视数据的传输。FIFO 可以用专用 FIFO 硬件芯片实现，也可以在 FPGA 内部实现。这里采用了后者。

图 4-6 即是这里的一个 FIFO 的结构。

这里采用 FIFO 的接口信号有：

- DIN[15:0]: FIFO 数据输入；
- DOUT[15:0]: FIFO 数据输出；
- WR_EN: FIFO 写入允许；
- WR_CLK: FIFO 写入时钟；
- RD_EN: FIFO 读出允许；
- RD_CLK: FIFO 读出时钟；
- AINIT: FIFO RESET 信号；
- FULL: FIFO 满指示信号；
- EMPTY: FIFO 空指示信号；
- ALMOST_EMPTY: FIFO 几乎空标志（下一个读操作后，FIFO 将变空）；

WR_COUNT[1:0]: FIFO 写入计数。

当 FIFO 写入时钟与 FIFO 读出时钟是同一时钟时称为同步 FIFO，反之则称为异步 FIFO。

这里采用的是异步 FIFO，每个打印头对应一个这样的 FIFO。FPGA 内部共实现了 4 个这样的结构，在一次 DMA 操作的不同阶段分别对 4 个 FIFO 写入打印数据。

图 4-7 是一个异步 FIFO 的典型时序图。这里 FIFO 控制信号包括：

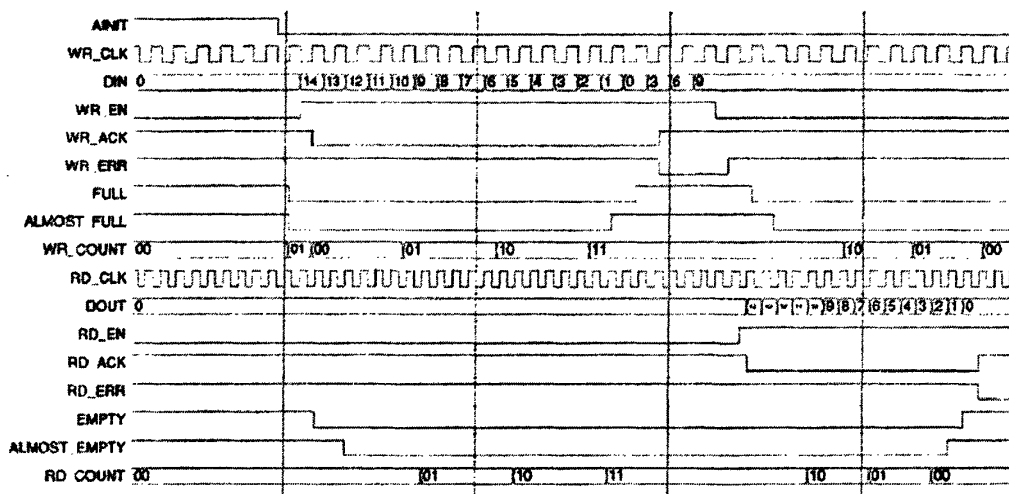


图 4-7. FIFO 操作时序图

Fig. 4-7. FIFO operation timing

1. FIFO 写入时钟 WR_CLK 和读出时钟 RD_CLK 都与 PCI 控制卡上的晶振 (32MHZ) 的输出同步。其频率分别是 30MHZ, 7.5MHZ;

2. FIFO 写入允许 WR_EN 由一次 DMA 操作中依次使能。一次 DMA 操作平均被分成 4 部分。每一部分对一个 FIFO 进行写入允许操作。即 $WR_EN \leq '1'$;

3. FIFO 读出允许 RD_EN。打印操作是按位置进行的。横向轨道上铺设的编码条提供了位置信号输出。打印严格按位置信号进行可以有效地保证打印的正确性。这时 FIFO 数据读出的流量和走过的编码条脉冲个数呈线性关系。因此 FIFO 读出允许 RD_EN，直接和编码条脉冲信号挂钩。

4. FIFO 数据输入，DIN[15:0]。这组信号直接通过 PLX9054PCI 桥芯片的数据总线获得。即为需打印的数据；

5. FIFO 数据输出，DOUT[15:0]。这是 FPGA 内部的信号。此信号并转串后，送往打印头；

6. FIFO 满指示信号 FULL。FIFO 空指示信号 EMPTY；

7. FIFO 几乎空标志 ALMOST_EMPTY；

8. FIFO 写入计数 WR_COUNT[1:0]。这些信号的组合运用以申请新的一次

DMA 操作。来补充 FIFO 内的数据。

4.2.3. 打印头工作时序的生成

打印头控制的第二个方面是打印工作时序的生成。打印头工作时序又包括两部分：配置数据加载（Configuration）时序和打印工作时序。

4.2.3.1 配置数据加载（Configuration）时序

打印头在上电后需要配置数据的加载，配置数据的作用是控制打印脉冲的形

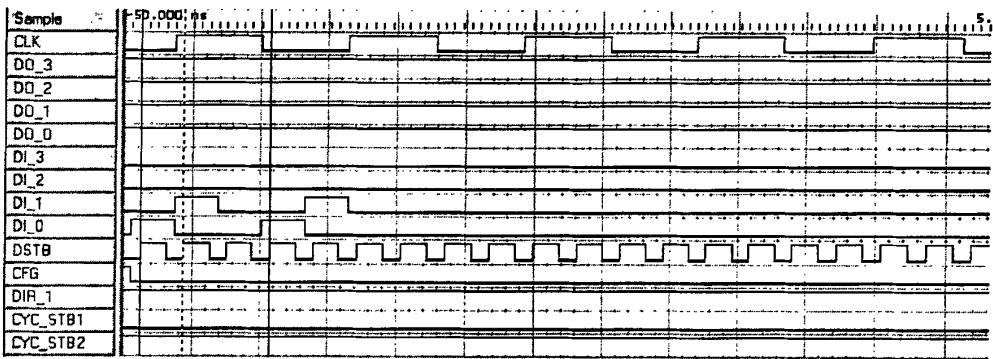


图 4-8. 配置数据加载过程（前段）

Fig.4-8 Configuration process(front segment)

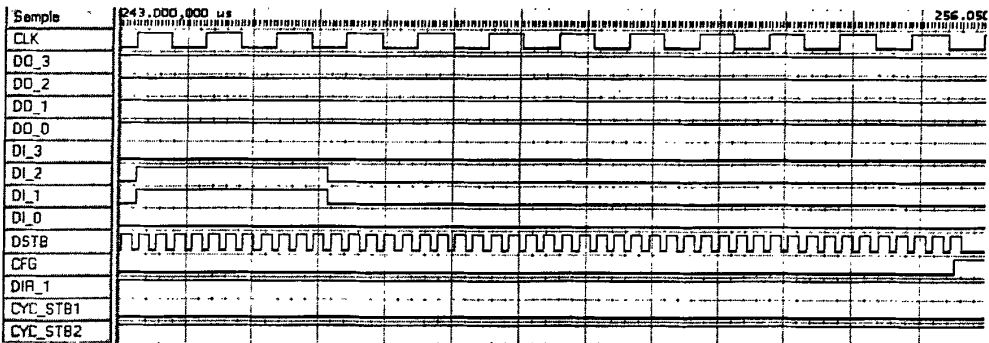


图 4-9. 配置数据加载过程（后段）

Fig.4-9 Configuration process(rear segment)

状。配置数据加载进入打印头内部的两个 ASIC 中。这一过程在每次打印头正常工作前必须进行，之后打印头才能正常工作。

加载过程是在字车板上完成的。打印头配置数据加载需要对打印头进行 1020 个 16 进制数的串行加载。DI0(LSB)LSB,DI1,DI2,DI3(MSB)四根数据线代表一个 16 进制数。DSTB 是加载时钟。加载过程是在 DSTB 的上升沿处进行的。DATA_nCONFIG 指示此过程为 Configuration。Configuration 进行时 DATA_nCONFIG 保持低电平，Configuration 结束后变高，FPGA 依据此信号来判断 Configuration 过程是否结束，以便下传打印数据。DIR 维持低电平。

图 4-8, 图 4-9 是 CPLD 运行时用逻辑分析仪进行信号采集后的时序图。由于加载过程有 1020 个数据。所以分图 4-8 和图 4-9 和来分别显示加载的开始和结束部分。

打印数据通过 DI_0, DI_1, DI_2, DI_3 并行送往打印头。加载时钟是 DSTB。CFG 是 DATA_Nconfig。信号加载的前五位数据是 1,2,0,1,2 图中可观察到数据和时钟的时序关系是正确的。CFG 在加载结束后跳高。指示加载过程的完成。加载过程 DSTB 的频率是 500KHZ。经测试验证 CPLD 的加载配置数据的时序是正确的, 时序关系符合打印头技术手册的要求。

4.2.3.2 打印工作时序

打印头在配置数据加载结束后就可以进行正常打印操作了。从时序的角度, 打印操作可分为打印数据装载, 执行打印两部分。打印数据装载对打印头进行每次喷射所需的 128 位数据 (0-127, 其中 0 和 127 位装载 '0') 装载。装载数据线是 DI3。装载数据时钟是 DSTB, 装载过程在 DSTB 的上升沿进行。在装载数据结束后紧接着 3 个 CYCLESTB 信号, 实现 128 个喷孔的喷射。DIR 设置打印方向。SAMPECLK 是整个控制时序的同步时钟。由它来驱动打印头内部的状态机。SAMPLECLK 的频率要保证在 CYCLESTB 的高电平期间包含至少两个 SAMPLECLK 信号。

直接决定打印操作的是 3 个 CYCLESTB (CYCLESTB 信号驱动打印头内部执行喷墨的压电部件)。CYCLESTB 信号与编码条信号有严格的时序对应关系。

图 4-10 是相关这部分的 VHDL 代码仿真的结果。

to_head_d3, to_head_dstb, to_head_cstb 分别是 DI3, DSTB, CYCLESTB1 信号。

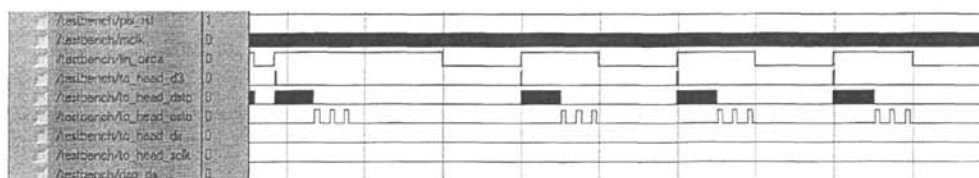


图 4-10. 打印过程 (全图)

Fig4-10. print process (overview)

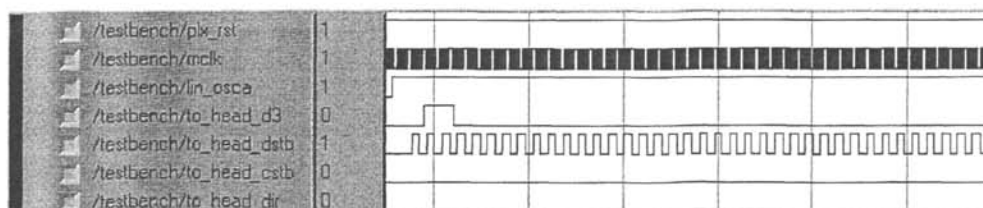


图 4-11. 打印过程 (局部放大)

Fig4-11. printing process (zoom)

lin_osca 是编码条的单路输出, 这里是 150DPI 打印模式。FPGA 只读取编码条的一路输出信号。从图中可以看到, 编码条信号成为了打印操作的触发信号, 在每一个编码条信号的上升沿到来后, 便进行一次打印操作。DI3, DSTB, CYCLESTB1 按时序要求生成。图 4-11 是打印过程信号时序关系的局部放大效果。

可以看到编码条方波是启动打印数据装载, 打印的触发信号。这样就实现了按位置进行打印的要求。按位置进行打印的最大优点是对运动控制系统的要求降低了。如果按速度进行打印控制, 打印时序的生成靠字车运行的速度来决定数据的下传速率, 这样打印时序是和字车行进速度同步的, 这就要求运动控制系统尽量保持运行平稳, 并且在两个编码条上升沿之间的时间内及时更改打印同步时钟。这对 DSP 程序提出了较高的要求, 而采用按位置进行打印则省去了这一要求。

4.2.4. 时序控制时序实验结果

打印头的控制成功与否取决于能否精确地控制打印头 128 个喷嘴中的每一个。为此采用了两个实验进行验证:

1. 独立控制任意喷嘴的喷射动作, 能使 1-127 号喷嘴中的任意一个打印出一条横向的直线;
2. 控制打印头打印锯齿波来验证打印头控制系统工作的正确性。

实验一的目的是:

1. 验证对打印头进行打印数据装载过程的正确性;
2. 验证对打印头喷嘴的控制。

实验二的目的是:

1. 喷嘴全速打印与部分打印效果的对比;
2. 验证按位置进行打印的正确性。

打印头的喷嘴平面是与打印的横向方向垂直安装的。安装示意图见图 4-12

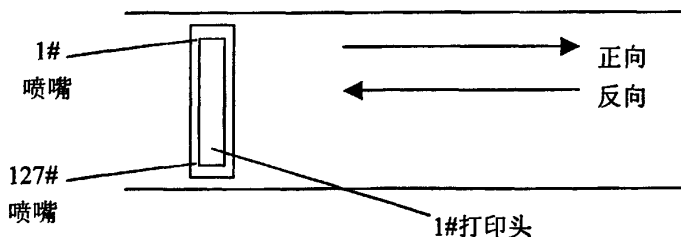


图 4-12. 实验装置结构示意图
Fig. 4-12. platform for testing

所示。并且只安装 1# 打印头。

实验一的结果见图 4-13 所示。实验中只有 1# 喷嘴进行喷射。其他 125 个



图 4-13. 单个喷嘴打印实验结果

Fig4-13. testing result of single nozzle operation

喷嘴关闭。这样当字车沿横向运动时，便打印出一条横向的直线，直线的宽度即是一个喷嘴单独喷射到纸面上的墨滴的直径大小。图 4-13 中有两条直线。是在纵向进纸一次后的第二次打印。打印是单向打印模式。打印分辨率是 150DPI。从打印效果来看，128 位打印数据的装载是正确的。打印无断点，重点现象。实验一达到了预定的目的。

实验二的结果见图 4-14 所示。为了实现锯齿波，在 FPGA 内部是通过向打



图 4-14. 锯齿波打印实验结果

Fig4-14. testing result of saw wave generation

印头发送一个 118 位的串行移位寄存器的输出来达到这一目的的。寄存器的初值是：00...10(117 位)，即 0-117 号喷嘴中在每次打印操作时只有一个喷嘴喷射。寄存器的移位时钟是靠编码条的输出信号来触发的，这里 FPGA 只检测一路编码条输出信号，即打印分辨率是 150DPI，单向打印。这样当打印头沿横向运动时，便打出锯齿波的图形。图 4-14 中的黑色粗线条是 FPGA 程序以固定的数据‘1’送入编号从 118 到 127 的十个喷嘴，让这十个喷嘴全部喷出，它们的打印数据不参加移位操作。这样可以对照喷孔在全速喷射时的打印效果。打印结果表明无断线，堵塞的情况。从打印的效果来看，实现了对打印头喷嘴的精确控制。锯齿波的形状表明，打印数据是按预想的结果送往打印头的，并且与喷嘴位置准确地对应了起来。打印是按照位置进行的，当字车突然停止时，打印操作立即停止。并且锯齿波的斜率是和编码条的输出信号有一固定的关系。当字车以不同的速度运动时，该斜率保持不变。

两个实验取得了预定的目的。证明打印头控制系统运行的正确性。

4.3 运动控制系统与打印头控制系统的连接

DSP 与 FPGA 的通讯是通过 DSP 的 I/O 空间进行的。两者的接口见图 4-15

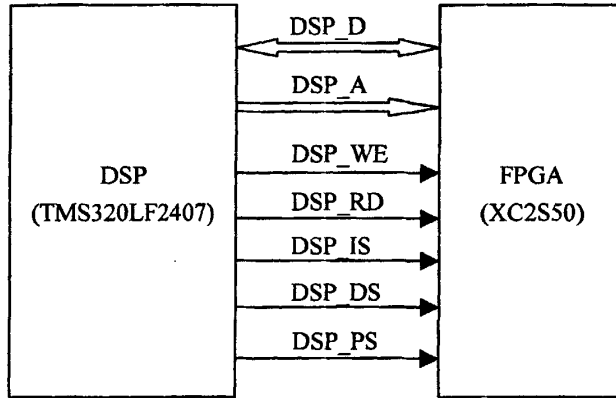


图 4-15. DSP 与 FPGA 的接口

Fig4-15. interface between DSP and FPGA

所示。下面是接口的具体信号：

DSP_D: DSP 数据总线 D0-D15;

DSP_A: DSP 地址总线 A0-A6。采用部分译码方式以减少硬件布线;

DSP_WE: DSP 写操作信号;

DSP_RD: DSP 读操作信号;

DSP_IS: DSP I/O 空间选通信号;

DSP_PS: DSP PROGRAM 空间选通信号;

DSP_DS: DSP DATA 空间选通信号;

DSP 侧

DSP 对外提供了三个空间即数据空间 DATA SPACE, 程序空间 PROGRAM SPACE, I/O 空间 I/O SPACE。DATA SPACE 和 PROGRAM SPACE。分别用来扩展外部数据存储器, 程序存储器。如 DSP 系统中的 SRAM 便扩展在数据空间和程序空间。I/O 空间可以用于 A/D, D/A 等场合。这里在 FPGA 是 DSP I/O 空间总线上的一个外部设备。DSP 对 FPGA 进行 I/O 空间的读写操作。DSP 的这一操作的时序图如图 4-16 所示。其中对 I/O 空间操作时 DSP_IS 变低指示这次总线操作是对 I/O 空间进行的。DSP_WE, DSP_RD 指示该操作是 DSP 写操作还是读操作。图 4-16 中所示是 DSP 写操作。读操作与其类似只是 DSP_RD, 信号变低。整个总线操作由 DSP_CLKOUT 同步。DSP_CLKOUT 是外部时钟源经过 DSP 内部的锁相环 PLL, 内部时钟预分频器后的时钟源, 这里 DSP_CLKOUT 的频率

是 30MHZ。DSP 芯片内的所有操作都是靠这一时钟进行同步的。

external memory interface write timings (continued)

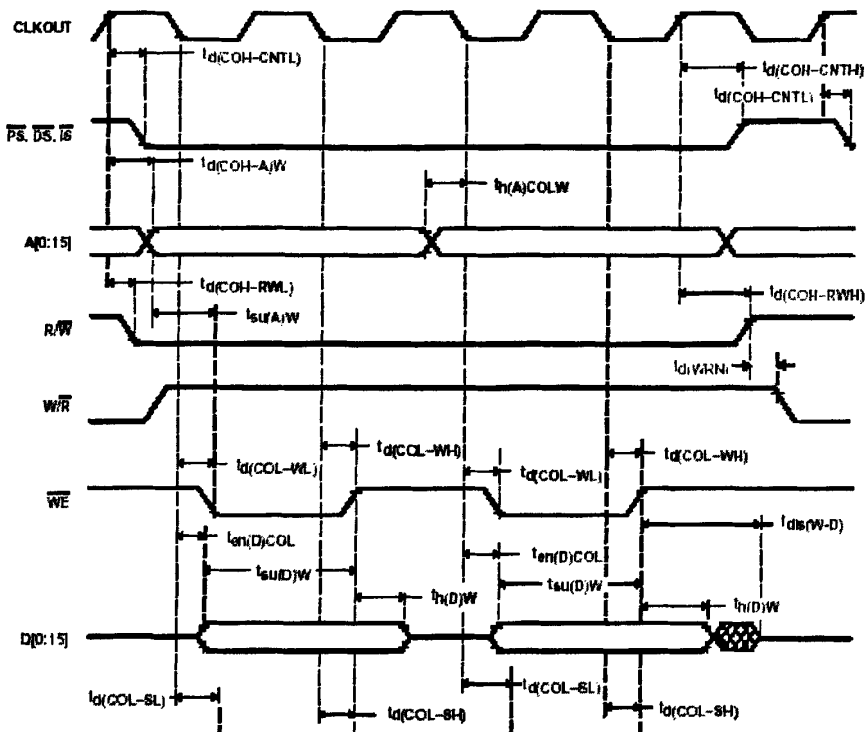


图 4-16. DSP 外部总线时序图

Fig4-16. timing of DSP externalbus

FPGA 侧:

FPGA 与 DSP 通讯的模块。是通过在其内部映射的寄存器来进行的。FPGA 程序的编写以 DSP I/O 空间的读写时序为设计依据。在 DSP 进行读写操作时 FPGA 内部将按要求接受数据总线上的数据，或将数据放在数据总线上。这一接

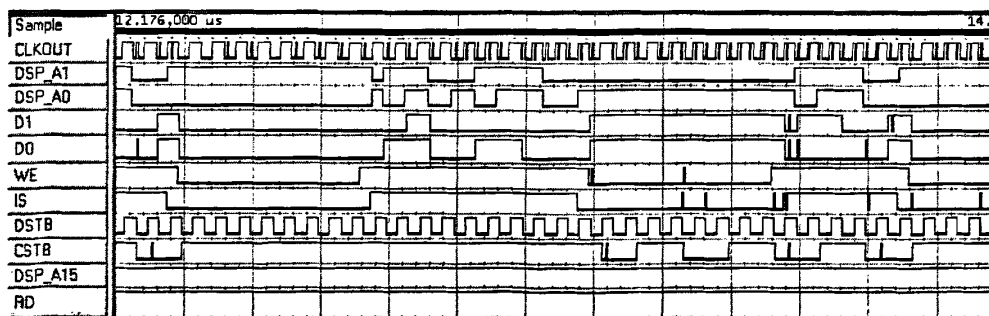


图.4-17. DSP 与 FPGA 接口的实验结果

Fig4-17. result of interface test between DSP and FPGA

口的实验结果经逻辑分析仪采集后的结果见图 4-17 所示。

这样从 DSP 的角度来看 FPGA 为它提供了一组可供读、写的寄存器。寄存器的定义见表 4-7:

表 4-7. DSP 与 FPGA 接口的寄存器定义

寄存器名称	DSP 对其进行的 操作	映射地址	操作定义
DIR—打印方向 寄存器	写	A15=1 A5--A0=000001	D= 0x0001 正向打印 D= 0x0000 反向打印
DPI—打印 DPI 选择寄存器	写	A15=1 A5--A0=000010	D= 0x0001 DPI=600 D= 0x0000 DPI=150
WE_EN—打印 使能寄存器	写	A15=1 A5--A0=000011	D= 0x0001 打印使能 D= 0x0000 打印禁止
STATUS—打印 状态寄存器	读	A15=1 A5--A0=000000	D0-DIR D1-DPI D2-WE_EN

注: DSP 地址线与 FPGA 的连接采用了 A15, A5-A0 共六根地址线。

DSP 可以通过对特定 I/O 空间的读写操作来控制打印的进行和获取打印的状态信息。

4.4 小结

本章主要论述如何实现打印头的控制。打印头控制要完成打印数据缓存, 打印时序生成两方面的工作。

文中采用 FPGA 进行打印数据的缓存。FPGA 内部丰富的 RAM 资源, 可由用户定义多种缓存方式。这里采用了 FIFO 的缓存方式。打印数据进入 FPGA 后进行排队, 按照先入先出的机制以此送往打印头。这一数据缓存的方式解决了非实时的计算机系统与实时数据下传的喷绘机控制系统的矛盾。从 PCI 控制卡硬件的角度看, 实现了传一部分, 打一部分的结构。这样就达到了不间断进行打印的要求。

打印时序的生成包括打印配置时序生成, 打印工作时序生成。这两部分分别由字车板上的 CPLD 和 PCI 控制卡上的 FPGA 完成。采用 CPLD, FPGA 可编程逻辑器件来实现时序控制是实现此类控制要求的最佳选择。具有时序参数可调, 生成波形稳定、质量好, 系统集成度高, 保密性强的特点。CPLD, FPGA 为打印数据建立起了高效, 顺畅的传输通道。这样的设计对喷绘机的系统升级提供了条件。

数据通道和控制通道的连接是喷绘机正常工作的必然要求。运动控制要能控

制打印数据流。并且运动控制要能得到当前的打印状态信息。文中采用 DSP 外部并行总线与 FPGA 进行接口。通讯两端严格遵照时序要求,保障了通讯的可靠。这样的设计使系统可按要求进行设置。具有接口灵活,可编程实现,通讯简单有效的特点。

文中以打印一条直线,锯齿波两个实验说明了打印头控制系统的正确运行。这两个实验也充分说明了本文设计的喷绘机高精度喷绘技术的实现手段是可行的。

第五章 结论与展望

5.1 本文主要研究工作及成果

课题组的任务是研制以 PC 为控制核心的喷绘机。现在已实现了喷绘机工作的初步功能。论文对喷绘机的控制系统进行了软件结构和硬件结构的分析。喷绘机高精度喷绘技术包括：喷绘机运动控制系统，打印头控制系统，以及两部分的连接。在第三章. 运动控制系统里，论述了以 DSP 为核心的运动控制系统的结构。对字车直流电机控制，进纸步进电机控制进行了控制效果分析。第四章. 打印头控制系统论述了打印头的工作原理，过程。指出打印头的正常工作有赖于其各个阶段工作时序的正确生成。这章还对 DSP 与 FPGA 的连接进行了论述，这一连接建立起了控制通道和数据通道之间的通讯。综合起来，本文可归纳为：

1. 采用先进的 DSP 芯片作为运动系统控制的实现手段。实现了直流电机和步进电机的精确控制。系统设计中充分体现出了 DSP 很强的接口功能，CPU 的高处理能力和丰富的硬件资源。整个运动控制系统结构紧凑，合理。这也提高了系统的可靠性。实际的运行结果表明：系统控制效果良好；
2. 把在通讯领域广泛应用的大规模可编程逻辑器件应用到喷绘机的设计中来。用 FPGA, CPLD 建立起了可靠，高速的数据通道。为高性能喷绘机的开发提供了一个很好的解决方式；
3. 打印头控制采用了以位置信号作为异步的打印触发信号。这样在保证打印精度的同时，对运动控制系统降低了要求，也提高了系统的抗干扰能力。

5.2 今后的工作

现阶段课题只是完成了部分功能的调试。在打印数据传输，多打印头位置安装对打印的影响等方面还需进一步的研究和调试。今后的工作将在以下几方面需要继续努力：

1. 打印数据传输，如何保证打印数据可靠，高速的下传进入打印头；
2. 控制通道和数据通道的建立还不是很完善，它们之间的很好的通讯机制的建立对实现系统整机功能是有很大帮助的；
3. 多打印头同时进行打印时，各种颜色之间的横向，纵向对准关系。这一关系直接影响打印的正常进行；

参考文献

- [1] TMS320C1x/C2x/C2xx/C5x Assembly Language Tools User's Guide
USA: TEXAS INSTRUMENTS AUG, 1999.
- [2] TMS320C2x/C2xx/C5x Optimizing C Compiler User's Guide
USA: TEXAS INSTRUMENTS AUG, 1999.
- [3] TMS320F/C24x DSP Controllers Reference Guide, CPU and Instruction Set (I
USA: TEXAS INSTRUMENTS AUG, 1999.
- [4] TMS320C20x User's Guide
USA: TEXAS INSTRUMENTS AUG, 1999.
- [5] VHDL 硬件描述语言与数字逻辑电路设计 修订版. 侯伯亨, 顾新编著 西安电子科技大学出版社 1999.
- [6] VHDL 程序设计 曾繁泰, 陈美金 著 清华大学出版社 2000.
- [7] VHDL 设计表示与综合 (美) James R.Armstrong F.Gail Gray 著 李宗伯 王蓉晖 等译 机械工业出版社 2002.
- [8] VHDL 语言 100 例详解北京理工大学 ASIC 研究所 清华大学出版社 1999.
- [9] Guide To Operation Xaar Ltd England
- [10] 3.3V DSP for Digital Motor Control C2000 Application TEXAS INSTRUMENTS 1999.
- [11] DSP 技术 彭启琮, 李玉柏 著 电子科技大学出版社 1997.
- [12] DSP 芯片的原理与开发应用 张雄伟 著 电子工业出版社, 1997.
- [13] 大规模可编程逻辑器件与数字系统设计杨晖, 张凤言 著 北京航空航天大学出版社 1998.
- [14] 在系统可编程技术器件与应用 杨万海 著 西安电子科技大学出版社 1998.
- [15] 可编程逻辑阵列 FPGA 和 EPLD 金革 著中国科学技术大学出版社 1996.
- [16] 电机控制专用集成电路 谭建成著 机械工业出版社 1997
- [17] TMS320LF240×DSP 结构, 原理及应用 刘和平 严利平 张学锋 卓清锋 著 2002
- [18] Getting Started in C and Assembly Code With the TMS320LF240x DSP TEXAS INSTRUMENTS 1999
- [19] SETRING UP TMS320 DSP INTERRUPTS IN C TEXAS INSTRUMENTS 1999
- [20] 步进电动机及其驱动控制系统 刘宝廷 程树康 等编 哈尔滨工业大学出版社 1997
- [21] 电机控制专用集成电路 机械工业出版社 1998
- [22] Xilinx 数字系统现场集成技术 朱明程 著 东南大学出版社 2001
- [23] 可编程逻辑器件与 EDA 技术 李景华 杜山远 著 东北大学出版社 2000
- [24] 大功率电子学和电机控制 谭苻娃 金如磷 著 上海交通大学出版社 1999
- [25] 可编程器件网站: www.fpga.com.cn
- [26] Xilinx 公司网站: www.xilinx.com
- [27] TI 公司网站: www.ti.com

致 谢

经过了两年半的学习。此时完成了我的毕业论文。这里我首先要向我的导师曹其新教授致以最衷心的感谢。正是曹老师，使我能从研一就提前进入课题。进行锻炼。每当我们的课题工作遇到难题或迷惑时，曹老师总是能够非常耐心地与认真探讨，仔细分析，帮助我们寻找到一个前进的方向，让我们得以更加充分的利用宝贵而又有限的时间。曹老师那严谨的治学态度和强烈的工作热情更无时无刻不在影响着我，激励着我全身心的投入到学习和研究工作之中。在曹老师的悉心指导和课题组成员的精诚合作下，我的研究工作取得了一定的成绩。通过不懈的学习和研究工作，我的个人能力和知识水平得到了不断的提高，积累了实践经验。所有这些不仅让我拥有了一个值得回忆的内容丰富的研究生生活，而且也必将为我未来的工作打下一个坚实的基础。

我要感谢自动化系的陈卫东老师。陈老师在项目进展中始终认真地帮我们分析遇到的问题，并提出可行的解决方案。使我们认识到了遇到问题解决问题的重要价值。还有薛祥川老师，他承担了项目的大部分工作。在自己工作，科研十分繁忙的情况下，帮助我解决了许许多多实际问题。我从他那里学到了很多专业技术的知识，方法。更为重要的是发现问题，分析问题，提出解决方案的思路。实验室的刘成良老师，殷跃红老师在我的研究生阶段和项目研发阶段都给了我很大的帮助和关心。使我渐渐地建立起科研的概念和克服困难的信心。还要感谢付庄老师，他在课题组非常尽职尽责，当遇到困难时他总是非常热心地帮我分析原因。给了我很多的思路。我还要感谢张宇明博士和张春余硕士，他们在完成自己的科研任务的同时，帮助我进行了大量的实验结果分析，他们的工作为发现调试中的问题带来了极大的帮助。在我撰写论文过程中，他们也给我提供了十分有益的意见和建议。

在此之后，我即将告别我的学生生活，走向全新的工作岗位。我将一如既往的把满腔热血投入到今后的工作和生活中去，不断迎接新的挑战。

攻读硕士学位期间发表的学术论文目录:

蓝牙无线通讯技术在 AGV 中的应用 机械与电子 2003.3

已发表

宽幅全彩喷绘机高精度喷绘技术的研究

作者：[殷晓光](#)

学位授予单位：[上海交通大学](#)

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1427077.aspx

授权使用：陕西理工学院(sxlgxy)，授权号：1d1990b8-1a8c-476e-8a4c-9df20118adb2

下载时间：2010年9月15日