

高速高精度数控雕刻机控制技术研究

摘 要

随着微电子技术和微型计算机技术的飞速发展，数控雕刻机的应用越来越广泛，但是国内雕刻机的加工速度和精度普遍低于国外产品。

本文对高速高精度数控雕刻机的控制软件进行了研究。其中总结了数控技术和雕刻技术的发展，确定了数控雕刻机控制软件的研制目标。讨论了数控雕刻机的特点与应用，阐述了雕刻机的控制原理、组成以及主要功能。研究了 CAM 生成的数据与 CNC 之间传输的方式，确定用 USB 接口作为 CAM 与雕刻机之间数据传输的方式。对嵌入式系统的理论进行了探讨，提出基于 ARM 处理器的雕刻机控制软件的结构。对数控系统核心软件插补技术进行了研究。并对控制系统中的几项关键技术进行了深入的研究：进给速度预处理技术以及进给速度控制方法；应用了一种具有“前瞻”功能的自动加减速控制技术，保证加工表面的精度和加工平稳性。最后，文章展望了基于嵌入式系统的雕刻机控制软件的发展趋势。

关键词：雕刻机；嵌入式系统；插补计算；直接函数计算法；速度预处理；

Research on the Control Technology of High Speed and High Precision Carver

Abstract

Along with the flying development of micro-electronics technology and microcomputer technology, NC carver will be widely used .But compared with overseas carvers ,the technique of homemade ones is in a very low level.

In this paper, the control software of the high speed and high precision NC-carver is developed. Make an overview on current situation of NC technology and carver technology, and then put forward the aim of the control software of NC caver. Discuss the characteristics and the application of NC caver , and its structure and main functions. Methods of data transmission between CAM and CNC, choose USB as the transmission interface. The embedded system theory is discussed. Put forward the software structure based on ARM processor. Study the interpolation technology, kernel part of the software. And also study several key technologies of the control system: pretreatment and control of machining speed, make an auto-control technique of acceleration and deceleration into use , which is with “look forward” function ,so that ensure the precision and the stabilization of machining. And at last, prospect the trend of the caver control software based on embedded system.

Key words: caver; embedded system; interpolation calculating; direct function calculating arithmetic; speed pretreatment

合肥工业大学

本论文经答辩委员会体委员审查，确认符合合肥工业大学硕士学位论文质量要求。

答辩委员会签名（工作单位、职称）

主席：	柯尊忠	合肥工业大学	教授
委员：	韩江	合肥工业大学	教授
	尹学治	合肥工业大学	副教授
	王健东	合肥工业大学	副教授
	沈国新	安徽宇电设备 制造有限公司	高级工程师

导师： 桂贵生

插图清单

图 1-1 雕刻系统发展示意图.....	4
图 2-1 计算机数控雕刻系统工作原理.....	9
图 2-2 计算机数控雕刻系统组成图.....	10
图 2-3 雕刻机数据处理流程.....	14
图 3-1 嵌入式系统构成.....	17
图 3-2 两类不同的嵌入式结构模型.....	19
图 3-3 嵌入式系统产品的开发过程.....	20
图 3-4 CNC 中三种典型的软硬件功能界面.....	22
图 3-5 雕刻系统软件结构.....	25
图 3-6 雕刻系统人机界面设计.....	25
图 4-1 粗插补.....	28
图 4-2 数控加工中数据流动方式.....	29
图 4-3 脉冲增量插补与数字增量插补对比.....	29
图 4-4 直线插补原理图.....	33
图 4-5 圆弧插补原理图.....	34
图 4-6 插补算法流程图.....	36
图 5-1 速度预处理图.....	40
图 5-2 加减速在数控系统中的位置图.....	41
图 5-3 直线加减速规律.....	42
图 5-4 拐点判断原理图.....	43
图 5-5 加减速标记判断流程图.....	45
图 5-6 速度预处理效果图 1.....	46
图 5-7 速度预处理效果图 2.....	48

独 创 性 声 明

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

学位论文作者签名：彭丹丹 签字日期：2005年6月8日

学位论文版权使用说明书

本学位论文作者完全了解 合肥工业大学 有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权 合肥工业大学 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、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

(保密的学位论文在解密后适用本授权书)

学位论文作者签名：彭丹丹

导师签名：

签字日期：2005年6月8日

签字日期： 年 月 日

学位论文作者毕业后去向：

工作单位：

电话：

通讯地址：

邮编：

致 谢

论文是在导师桂贵生教授的悉心指导与关怀下完成的，在此向导师表示衷心的感谢！在我攻读硕士学位期间，在学业与生活上都得到了桂老师热心的关怀。桂老师渊博的学识，开阔的思维，严谨的治学态度，对我产生了深刻的影响！桂老师对前沿问题把握十分准确，工作更是一丝不苟，待人方式平易近人，为我树立了为人和治学的榜样，激励着我不断地开拓进取。

衷心感谢尹志强老师、闫真才硕士、李付军硕士，他们在课题研究调试过程中给了许多配合与帮助。

衷心感谢何庆博士、仓公林博士、吕焜硕士、许良元硕士以及贾庭会硕士、王艳琴硕士对我的帮助，与他们在一起工作和学习这一段时间，从他们身上学习到了很多知识！

感谢我的同学王芳、李红英、王淑杰、常秋香，感谢她们三年来不断的帮助和鼓励！

感谢本科、硕士时期的同学们，与他们的交流中，我得到不断的进步和提高。

感谢所有关心、支持和帮助过我的老师、同学和朋友们！

最后还要感谢我的父母与家人，是他们数十年的辛苦劳动、默默支持与鼓励给予了我强大的精神支柱，使我最终完成学业。

作者：彭丹丹

2005年5月

第一章 绪论

1.1 计算机数控雕刻技术

1.1.1 数控技术的发展现状及趋势

计算机数控（CNC）集传统的机械制造、计算机、自动控制、电气传动、传感检测和信息处理等技术于一体，是先进制造技术（如柔性制造系统、计算机集成制造系统）的基础，是数控机床的核心，它的迅速发展和广泛应用，使得普通机械逐渐被高效率、高精度的数控机械所代替，从而形成了巨大的生产力。CNC 的技术水平高低已成为衡量一个国家工业现代化的重要标志之一^[1]。如今，数控技术作为实现制造业自动化、柔性化、集成化生产的基础，已成为先进制造技术的重要组成部分，是发展现代集成制造和智能制造的主体技术，是当今各种先进制造系统的基础和前提条件。努力发展数控加工技术，并向更高层次的信息化、自动化、柔性化、敏捷化、网络化和数字化制造方向推进，是当前机械制造业发展的方向^[2]。

数控系统是数控技术的核心，数控系统的发展是数控技术和数控机床发展的关键。半个世纪以来，数控系统已由专用硬件数控发展为超大规模集成电路微处理器为核心的计算机数控，也称为计算机软件数控。当今已发展到了很高的水平^[3-6]。

（1）数控系统微处理器的（CPU）由 8 位字长增加至 16 位和 32 位，时钟频率由几兆 Hz 提高到几百兆甚至若干个 G。最近还开发了 64 位 CPU，并且开始采用精简指令集运算芯片 RISC 作为 CPU，使运算速度得到进一步提高。此外，大规模和超大规模集成电路和多个微处理器的采用，使数控装置的硬件结构标准化，模块化和通用化，使数控功能可根据需要进行组合和扩展。

（2）数控装置设备由多种遥控和智能接口，如 RS232C 串行接口、RS422 高速远距离串行接口以及 DNC 接口等。配备 DNC 接口，可以实现几台数控机床之间的数据通讯，也可以直接对几台数控机床进行控制。此外在数控装置中采用 MAP 等高级工业控制网络或 Ethernet（以太网），为解决不同类型不同厂家生产的数控机床的联网和数控机床进入 FMS 和 CIMS 等制造系统创造了条件。

（3）数控装置具有良好的操作性能。装置上设置了很好的人机界面，普遍采用薄膜按键，减少指示灯和按键数量；大量采用菜单选择操作；彩色液晶显

示器，不仅显示字符、平面图形，还能显示三维动态立体图形。这样使操作越来越简单。

(4) 数控装置的可靠性大大提高。大量采用高集成度芯片、专用芯片及混合式集成电路，减少了元器件数量。电子元器件采用表面安装工艺 (SMT)，实现三维高密度安装。元器件经过严格筛选。这样提高硬件质量，降低功耗，极大地提高了系统的可靠性，使得数控装置的平均无故障时间 (MTBF) 达到 10000~36000 小时。20 世纪 80 年代末、90 年代初出现了 CNC 系统的开放式体系结构，其硬件、软件和总线规范符合国际和公认的标准，且都是对外开放的，为数控设备制造厂家和用户二次开发出具有各自技术特色的系统提供了有力的支持。

为更好满足市场和科学技术发展的需要，满足现代制造技术对数控技术提出的要求，当代数控系统呈现新的发展趋势，主要体现在以下几个方面：

(1) 高速、高效、高精度、高可靠性发展方向^[7-8] 高速高精度加工技术随着数控加工设备与高性能加工刀具技术的发展而日益成为进一步提高加工速度和精度，数控系统采用高速 CPU 以缩短采样周期和程序处理时间，或利用多 CPU 结构，使得各 CPU 可并行处理插补计算、系统调度、伺服控制、数控系统与外围接口通讯等；采用直线电机伺服驱动系统，可以提高加工精度和运动速度；提高自适应控制系统智能化程度，保证系统更高的可靠性和加工精度。

(2) 智能化、开放化、网络化和集成化的发展方向

数控系统的智能化主要包括：自适应控制、专家系统、故障诊断系统、智能化数字伺服驱动等；

开放性^[7-10] 采用通用计算机组成总线式、模块化、开放式、嵌入式体系结构，便于裁减、扩展和升级，组成不同档次、不同类型、不同集成程度的数控系统。开放式数控系统将成为新一代的数控系统。目前，对开放式数控系统的研究有美国的 NGC、欧共体的 OSACA、日本的 OSEC、中国的 ONC 等。

网络化和集成化^[7] 数控机床向网络化和集成化系统发展的趋势是：从点（数控单机、加工中心和数控复合加工机床）、线（FMC、FMS、FTL、FML）向面（工段车间独立制造岛、FA）、体（CIMS、分布式网络集成制造系统）的方向发展。

(3) 功能发展方向 数控系统功能发展方向体现在以下几个方面：用户界面图形化、科学计算可视化、插补和补偿方式多样化、内装高性能 PLC、多媒体技术应用。

(4) 关于数控标准^[11-14] STEP-NC 是一个新的 NC 编程数据接口国际标准 (ISO 14649)，它于 1996 年制定，在 2001 年成为国际标准草案 (Draft International Standard, DIS)，目的是取代现在使用的 NC 编程接口标准 ISO 6983。ISO 14649 是基于 STEP 标准的 NC 程序接口，它使用面向对象的方式避

免了信息的丢失，它把每一个加工步骤都定义成独立的对象，每个对象又包含各种描述性的属性。通过严格地分离几何数据、操作数据、加工数据等这些数据，简化了信息的存储和访问，使不同模块之间可进行信息交换。它提供一种不依赖于具体系统的中性机制，能够描述产品整个生命周期内的统一数据模型，从而实现整个制造过程，乃至各个工业领域产品信息的标准化。

目前，STEP-NC 成了世界工业化国家研究的热点，其中较具代表性的研究项目有欧洲的 STEP-NC 项目、美国的 Super Model 项目、日本的 Digital Master 项目等。国内在该领域的研究才开始起步，山东大学、合肥工业大学、哈尔滨工程大学等已开始了 STEP-NC 的研究。

STEP-NC 的出现将使机床数控系统发生重大的技术变革，它必将引起 CAD/CAM 与 CNC 功能和市场格局方面的重新划分，同时它也代表了一种新的制造理念，对产品全生命周期信息的无缝集成和制造一体化必将产生巨大的推动作用。

1.1.2 雕刻技术的发展

雕刻加工是一种很传统的手工艺，在艺术品、标牌、首饰等行业具有悠久的历史^[15]。但传统的雕刻加工一般都是手工艺，产品的质量主要取决于对雕刻师傅的技艺水平，而且劳动生产率低，成本价格高，可重复性差。随着市场需求的不断扩大以及模具工业的迅速发展，除首饰、标牌和工艺品的模具制造需要雕刻以外，很多日常生活用品（如服饰用品、钟表零件）的模具也都需要雕刻加工，导致了雕刻加工向自动化方向发展。

目前，雕刻系统主要分为两种：一种是激光式雕刻系统，它采用激光作为加工工具进行雕刻加工；另一种是机械式雕刻系统，它采用传统的切削式加工方法进行雕刻加工。这两种雕刻系统各有特点，应用区域也不尽相同。激光雕刻对加工材料有一定的限制，它无法加工石材等材料，主要应用于标牌业和广告业；而机械式雕刻系统可加工软到橡胶硬到石材等各种材料，应用范围也较激光雕刻系统广泛得多。

机械式雕刻系统又可以分为仿形雕刻机和计算机数控（CNC）雕刻机两大类。机械式雕刻系统可以完成有互换性要求的雕刻加工和模具雕刻加工。计算机数控（CNC）雕刻机按驱动电机分类，可分为步进电机驱动的计算机数控雕刻机和伺服电机驱动的计算机数控雕刻机；按运动坐标类型进行分类，分为三坐标 CNC 雕刻机和五坐标雕刻机；按机床结构进行分类，分为立式 CNC 雕刻机、卧式 CNC 雕刻机和龙门 CNC 雕刻机等。雕刻系统的发展示意图如图 1-1 所示。

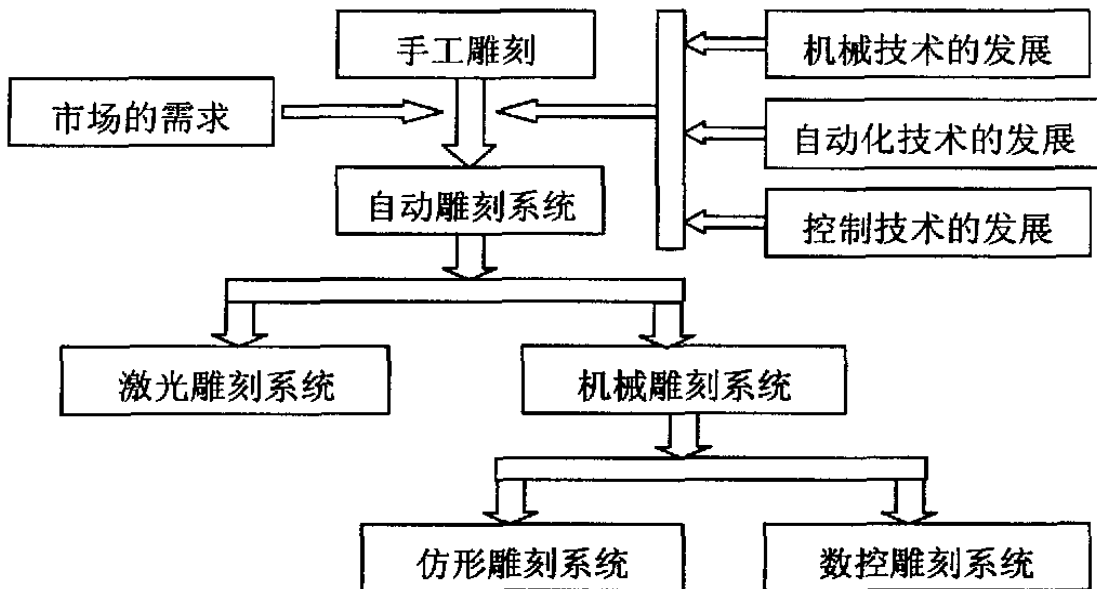


图 1-1 雕刻系统发展示意图

1.2 数控雕刻机的研制目标

随着微电子技术和机电结合深度的提高，产品的附加值也随着不断提高。数控雕刻机是一种典型的机电一体化设备，研制的总体目标是提高该产品在市场竞争中的竞争能力，研制目标具体体现在以下几个方面：

(1) 提高可靠性并降低成本，开发基于软件控制的雕刻机数控系统。依靠和发挥软件技术优势，提高系统性能，降低成本，加快产品的开发周期。

(2) 通过提高数控系统的插补运算速度和精度，处理好 CAM 生成的微小直线段间的加减速，提高控制速度的平稳性，实现高速高精度雕刻加工。

(3) 模块化 将雕刻机从软、硬件结构上按功能划分模块，各功能模块相对独立研究、发展和完善，通过标准接口联成系统。

(4) 柔性化 提高产品应用功能的灵活性，适应用户多样化的要求。

1.3 课题的主要研究内容

本课题来源于安徽力宇电脑设备制造有限责任公司的合作项目“高速高精度数控雕刻机的开发研究”。论文主要研究了以 32 位单片机为控制核心，对 CAM 生成的加工代码作编译、解释和插补计算，对雕刻机刀具运动轨迹和速度进行控制。高速高精度雕刻加工和传统的铣削加工有很大的差别，开发高速高精度雕刻机数控系统有一定的难度和深度，因此本论文的研究内容对发展和提高数

控雕刻技术有一定的理论意义和应用价值。

本论文主要的研究内容包括：

1、以先进的简指令微处理器 ARM(Advanced RISC Machines)作为 CPU，它在功耗、数据传送、数据处理速度以及 DSP 功能方面处于领先水平，以 ARM7 微处理器作为雕刻机的控制核心；

2、研究快速数字增量插补技术，开发插补计算软件，提高插补速度和精度。

3、研究速度前瞻预处理技术和自动升降速控制技术，开发前瞻处理软件和自动升降速软件。

本课题技术创新点：

在以 ARM 微处理器为核心的单片机上实现复杂的数字增量插补、速度前瞻预处理、自动升降速处理。

第二章 高速高精度数控雕刻机控制系统

随着雕刻工具和技术不断改进，雕刻行业所涉及的领域越来越广，如在模具、广告、精密加工等方面，数控雕刻机得到了广泛的应用。数控雕刻机不仅可以完成大多数传统的雕刻工作，如玉石、首饰、木雕、纪念币、小模具等，而且扩展了新的雕刻领域，如艺术浮雕、复杂零件、高精度模具等。数控雕刻机的整个运作都以计算机自动控制为核心，摆脱了雕刻过程对人的依赖，提高了雕刻效率，改善了雕刻质量。

2.1 计算机数控雕刻机的概述

2.1.1 计算机数控雕刻机的应用与特点

计算机数控雕刻系统（又称电脑雕刻机、雕刻机器人）是 CAD/CAM 一体化的典型产品。计算机雕刻系统集成扫描、编辑、排版、控制雕刻诸多功能于一体，能方便快捷地在各种软性材料（有机玻璃、双色板、多层板、工程硬塑、ABS 沙盘模型板、PP、PVC、板材、亚克力、木材、橡胶等）和硬性材料（黄紫铜、铝、不锈钢、钛合金、工具钢、汉白玉、大理石等）上雕刻出逼真、精致、耐久的二维图形、文字及三维立体浮雕。

计算机雕刻系统的应用领域广泛，举例如下：（1）广告及礼品制作业，用于雕刻各类双色板标牌、有机玻璃、三维广告牌、双色人物雕像、浮雕奖章、有机板浮雕、立体门头字等。（2）模型制作业，制作沙盘模型、房屋模型等。（3）模具制作业，雕刻纽扣浮雕模、印刷烫金模，注塑模、冲压模、鞋模等。（4）木器业，用于浮雕图案设计及制作。（5）印刷行业，用于凹凸板制作。（6）烟草行业，用于包装烟盒防伪标志模板制作及卷烟字轮制作。（7）印刷电路板（PCB）新产品开发中的电路制作，钻孔、铣槽等。（8）印章业，各类字体各类材料的印章雕刻。（9）电火花加工机床电极雕刻加工。（10）机械加工工业，刻度盘字轮及标尺刻度。（11）装饰制品雕刻。（12）照相机光圈变焦零件及刻度加工。（13）手表表面及表壳模具制造。（14）冰箱压缩机阀板等复杂零件加工。（15）砚台艺术雕刻加工。（16）汽车工业、轮胎模具，车灯模具及装饰品模具加工。（17）包装业等字模加工。（18）制作各种员工胸牌、各类门牌、指示牌。（19）首饰精细雕刻。（20）液压泵转子定子封油槽加工。等等。而且，随着各种新型装饰材料不断出现，能用于雕刻的材料越来越多，使得计算机数控雕刻机有了更大的用武之地。因此，计算机数控雕刻机的应用范围还将不断扩大。

数控雕刻机的主要特点：

(1) 自动化程度高。具体的雕刻过程都是数控雕刻机自动完成的。

(2) 产品的尺寸精度高，一致性好。数控雕刻过程是由计算机控制完成，可以达到很高的精度和表面质量；批量加工时，产品的一致性好，这对于小模具行业十分重要。

(3) 拓展了雕刻领域。只需改变控制程序，数控雕刻机便可以雕刻浮雕、各种复杂的曲面，支持各种刀具，改善了雕刻表面质量，提高了雕刻效率。

(4) 数控雕刻机都有钻铣功能，可用于钻孔、切边、加工小模具，性价比高。

2.1.2 计算机数控雕刻机发展现状

20 世纪 90 年代以来，微电子技术的突飞猛进直接推动了微型计算机的迅速发展，而微电子技术和微型计算机技术又带动整个高技术群体飞速发展，从而使雕刻机有了质的飞跃。雕刻机经历了从 2D→ 2.5D →3D 加工的变革，功能完善、性能稳定、造型美观和价格合理成为雕刻机研制的基本要求^[16]。

国外的雕刻机，如美国的“雕霸”、法国的“嘉宝”和日本的“御牧”是该行业的佼佼者，但价格昂贵。近几年国内的雕刻机，如北京的“精雕”、上海的“啄木鸟”在国内也有一定市场，价格也不菲^[17]。

目前国内数控雕刻机的技术水平：

(1) 数控雕刻机的 CAD/CAM 软件 大多数数控雕刻机都声称能接收多种格式的刀具路径数据文件，包括通用机械 CAD/CAM 软件的输出格式，如 MasterCAM、Cimatron、UG 等，但采用文泰雕刻软件的居多，唯独精雕采用其自主知识产权的 CAD/CAM 软件 JDPaint。

(2) 数控装置 目前雕刻机的数控装置可分为三种类型，即基于 IPC 的控制器，基于 DSP (Digital Signal Processing) 的控制器和基于单片机的控制器，单片机的处理功能较强，DSP 控制器处理速度快。

(3) 雕刻机的加工效率和加工质量 文泰雕刻软件采用微线段逼近轮廓曲线的技术方案，刀具在线段的交接点处停顿，加工表面不光滑，刀具运动速度变化频繁，进给速度 $<3\text{m}/\text{min}$ ，加工效率较低：

美国麦迪克三维雕刻机(MultiCam)采用 AMDSC520 微处理器作为控制核心，具有 1000 行代码的前瞻功能，最大加工速度 35 米/分钟，整体技术水平高于国产雕刻机，但价格也高于国产雕刻机。

(4) 控制软件方面 数控雕刻机控制系统是典型的多任务实时系统，系统必须对多种任务进行实时控制。为了实现软件结构的模块化、可重用性、用户的易操作性，都采用通用的操作系统。目前，通常选用的通用操作系统有很多，

如 DOS、WINDOWS93/98/NT/CE、 μ C/OS、LINUX 等。

2.1.3 计算机数控雕刻机发展方向

依托现代计算机技术的不断创新，机构设计、电机应用、控制芯片、软件平台和程序设计等领域的发展，将持续改进和提高雕刻机的性能；而今后计算机通讯的网络的迅猛发展，也将给雕刻机带来一场革命^[19]。下面是数控雕刻的几个发展方向^[19-20]：

1、CAD/CAM 软件发展方向 目前雕刻机所采用的 CAD/CAM 软件多数将雕刻图形轮廓离散成微小直线段，限制了雕刻精度的提高。因此，未来的雕刻机 CAM 软件必定会增加多种曲线（如抛物线、样条曲线等）逼近加工轮廓的方法，以提高加工精度。通用 CAD/CAM 软件如 Pro/E 等也将逐渐应用于雕刻领域。

2、刀具性能的提高 随着雕刻所使用的材料越来越广泛，对雕刻刀具的种类、材料以及性能的要求也越来越高，各种刀具材料如金属基陶瓷、聚晶金刚石等高速切削刀具将广泛应用于雕刻加工之中。

3、高速高精度 现在国内的雕刻机大多是采用步进电机控制进给的开环系统，位置控制精度和加工精度都不高。今后的雕刻机控制部分将向闭环、半闭环系统发展，通过反馈调节，对误差进行补偿，进给部分采用更高精度的滚珠丝杠和伺服电机，可进一步提高雕刻系统的精度和速度。

4、高效高可靠性 高效来源于高速进给和高速切削，这取决于性能更好的电机和刀具的研究；为了提高可靠性，一方面控制电路将采用更稳定更可靠的 DSP 技术，另一方面进一步提高电机性能也是刻不容缓的。此外软件方面也要进一步提高，如采用面向对象技术等。

5、多轴联动 多轴联动可以完成更复杂的雕刻动作，雕刻出更复杂、更精密的图案。多轴的联动将是数控雕刻机的一个发展方向。

6、柔性化 开放式数控系统的概念逐渐应用于雕刻机中，软硬件的通用化、模块化和标准化，大大提高雕刻机的柔性，可以采用不同的软硬件模块，组成不同档次不同要求的数控雕刻系统。

7、网络制造 将雕刻机用网络连接起来，通过分布式系统，智能的选择当前空闲的雕刻机完成当前的任务。充分、高效地利用系统资源，实现多品种、大批量的生产。

2.2 计算机数控雕刻系统的控制原理

计算机数控雕刻系统实际是一个三维数控系统，其工作原理如图 2-1 所示：

通用微型计算机内安装专用的设计排版软件进行图形、文字的设计、排版，自动生成加工路径信息，通过 USB 接口或其他数据传输接口（RS232、RS485 等）将刀具路径数据传输给单片机，数控系统接收刀具路径数据，完成显示、和用户交互等一系列功能后，用特定的算法将输入的路径信息转化为数控信息，控制器把这些信息转化为驱动步进电机或伺服电机的信号（脉冲串），控制雕刻机 X、Y、Z 三轴的走刀。同时，雕刻机的高速旋转主轴，通过按加工材质配备的刀具，对固定于主机工作台上的工件进行铣削，即可雕刻出在计算机上设计的各种平面或立体的图形文字，实现雕刻自动化加工^[18]。

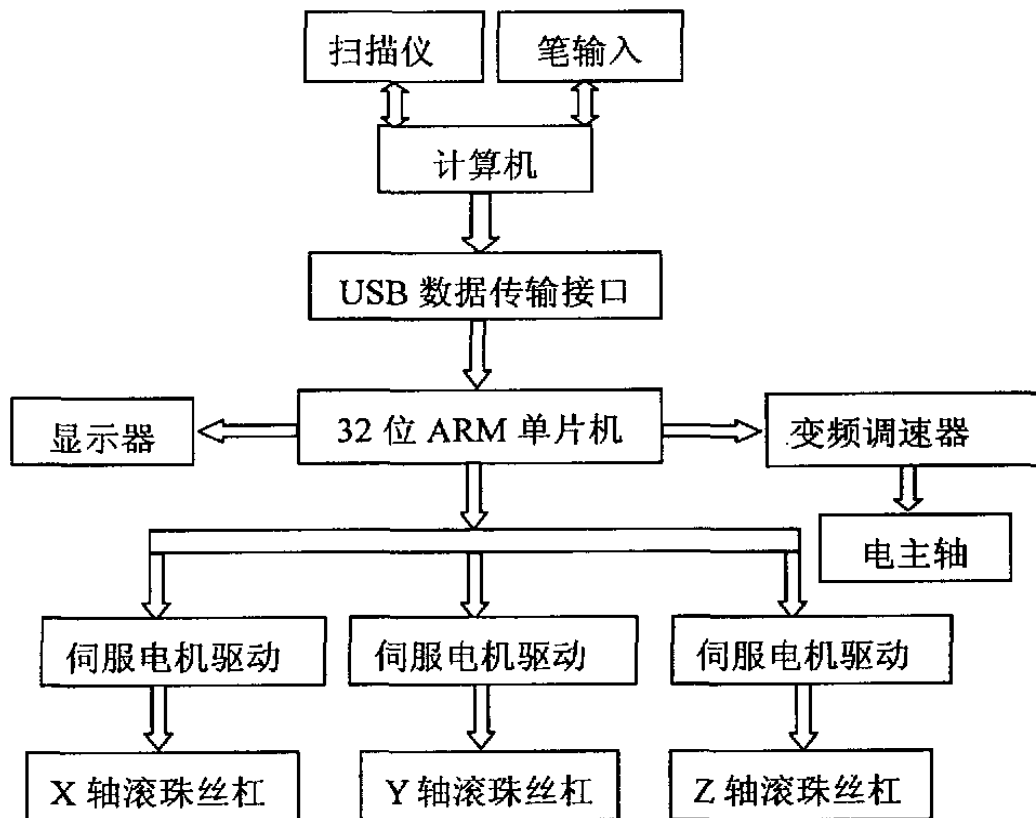


图 2-1 计算机数控雕刻系统工作原理

2.3 计算机数控雕刻机系统组成

2.3.1 计算机数控雕刻系统的组成

计算机数控雕刻系统由硬件和软件两大部分组成，硬件包括：控制计算机、雕刻机控制柜、雕刻机主机及加工刀具、辅助工具等五部分，其中计算机是核心；软件包括：计算机设计排版和雕刻控制软件两部分，其中雕刻控制软件是软件的核心，由它来协调、控制雕刻工作的进行，系统组成如图 2-2 所示：

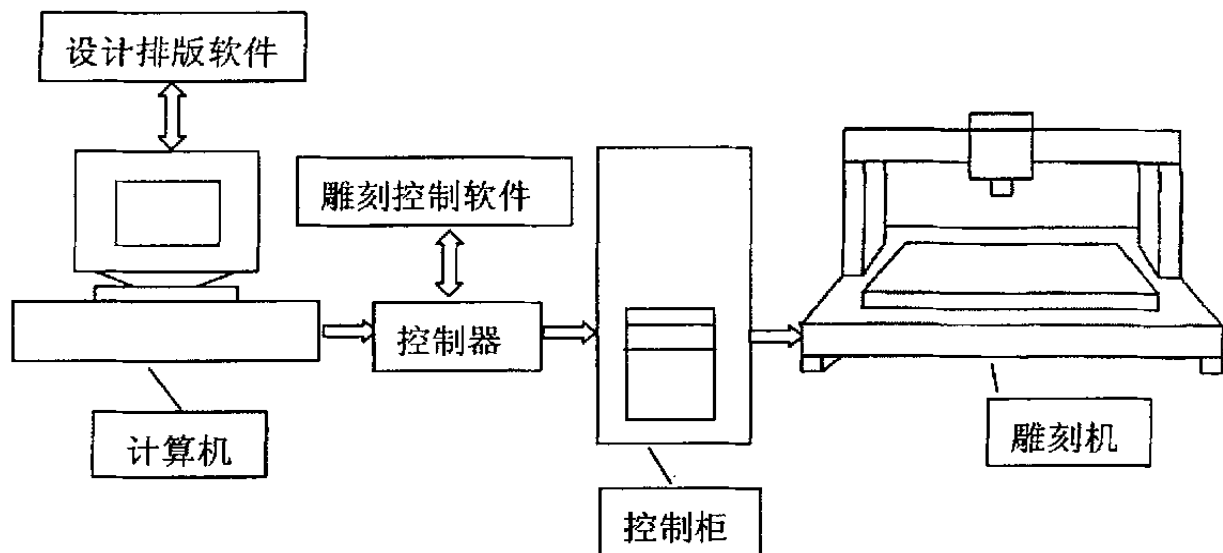


图 2-2 计算机数控雕刻系统组成图

计算机数控雕刻系统各组成部分的功能简要介绍如下：

硬件包括以下六个部分：

1、雕刻机主机 它是这个系统的加工主体，通过它完成图形雕刻、轮廓铣削等工作。

2、控制柜 它是雕刻机主机各运动轴的电机驱动部分。它将计算机产生的控制信息转化成能驱动 X、Y、Z 三轴步进电机或伺服电机的功率信号（脉冲串），控制雕刻机主机的 X、Y、Z 三轴完成相应的运动，同时它还控制雕刻头的高速主轴电机。

3、计算机 一般是普通 PC 机，主要完成图形、文字的设计、排版和编辑工作。

4、控制器 这里我们采用的是 32 位 ARM 单片机，它是数控雕刻机的核心，完成插补控制、速度控制以及位置控制等任务。

5、加工刀具 装夹在雕刻机主轴上，完成具体切削任务。

6、辅助工具 主要有装夹夹具等，完成雕刻工作的装夹等任务。

软件包括以下两个部分：

1、计算机设计排版软件 是一个 CAD/CAM 系统，完成图形、文字的设计、排版编辑工作和数控雕刻程序的自动生成。

2、计算机雕刻控制软件 是一个 CNC 系统，它读入数控雕刻程序（数据），将其转化为雕刻机的控制命令。

2.3.2 雕刻机 CNC 数控系统的主要功能

雕刻机数控系统具有铣床数控系统的大部分功能，另外还具有一些特殊功能。雕刻机 CNC 数控系统的主要功能有：

1、数控雕刻程序的输入和预处理 主要功能是完成数控雕刻程序的读入和预处理，提取数控加工所需的有用信息。输入为数控雕刻代码文件，输出为雕刻代码文件经分析后得到的命令集和数据集合。

2、高速插补计算 在规定的起点、终点之间按照一定的算法进行数据点的密化工作，并将其分解成相关坐标轴的移动量，从而转化成控制坐标轴运动的命令。

3、多轴联动控制 联动是指系统按照某一规律控制几个坐标轴能同时协调运动，其相关的坐标轴称为联动轴。所谓轴控制就是指系统能够对几个坐标轴方向的运动实现独立控制。若系统能够对 X、Y、Z 三个坐标轴方向上的运动实现控制，则称该系统为三控制轴的数控系统；若能对 X、Y、Z、A、B、C 坐标轴进行控制，则称该系统为六控制轴的数控系统。通常雕刻机都能实现三轴的联动控制。

4、速度前瞻预处理和自动升降速控制 机床具有前瞻控制能力使 CNC 系统在加工过程中能够提前对一定数量的程序段进行预处理，从而能够预测加工方向的突然改变而相应的降低进给速度；同时为避免或减少机床运动部件在运动状态发生变化时（例如加速、减速、起动、停止）产生的冲击，数控系统应具有自动平滑加（减）速的功能。例如：加速进给时，一般采用直线型加速。

5、高速主轴的调速控制 包括对高速主轴的变频调速，以适应不同材料、不同图形的加工要求。

6、雕刻加工仿真 也就是加工路径模拟，可以模拟实际的加工环境和刀具运动路径，直观地显示刀具路径的加工次序和加工效果，有助于帮助用户及时发现并解决刀具路径隐含的问题，生成正确的刀具路径，从而提高生产效率，降低生产成本。

2.4 CAM 加工数据的传送与处理

数控雕刻机所使用的加工程序通常是利用 CAD/CAM 软件生成的，程序量的大小随着加工图形复杂程度的不同而不同，有些模具和复杂曲面的加工程序有时达到几十兆甚至更大，那么加工程序从 PC 机到雕刻机的准确、高效传送和有效处理是雕刻机数控系统必须解决的关键问题之一。

2.4.1 CAM 加工数据的传送方式

CAM 生成的加工程序与数控系统之间的传送方式有以下三种：

(1) 利用 PC 机接口

这种方法是通过上位机和数控系统的通讯接口来实现的，主要有 RS232 或 RS485 等串行或并行通讯接口。它是一种主从式结构。上位机的功能是传递 NC 程序，实现集中控制和管理。数控系统在内存中开辟缓冲区，加工开始往缓冲区读入数据，直到写满缓冲区后，禁止上位机发送，可以选择数据全部读完后通知上位机开始发送数据，也可以在缓冲区有一半空间时开始请求发送数据，相应地雕刻加工与数据传送有顺序执行和同时执行之分。

(2) 网络传送

数控系统配备网卡，可以通过局域网与 PC 机实现数据的传输与共享。有的还配备 flash 电子盘，可以存放系统接收的加工数据和加工信息，实现一次性下载加工程序。

(3) 移动存储设备传送

移动存储设备传送主要通过软盘、带 USB 接口的 U 盘或 CF 卡传送。编程人员可以很方便地将在 PC 机上生成并经过校验的加工程序，通过软盘等移动存储设备传送到数控系统里。

其中 USB 接口具有即插即用、速度快、低功耗、硬件结构标准化等特点，各种具有 USB 接口的嵌入式 USB 主机已广泛应用于各种机电产品之中^[21]。

考虑到嵌入式系统的特点；以及对比各种传送方式的优缺点，本雕刻机数控系统采用的是利用 U 盘传输数据，控制系统带有 USB 接口，可以一次性从 PC 机上下载一个完整的加工程序，几乎不受程序大小的限制，并且数据不易丢失，从而实现雕刻机在加工过程中完全脱离 PC 机，即真正意义上的嵌入式系统。

2.4.2 CNC 对加工程序的读取

虽然可以使用 U 盘从 PC 机上一次性下载加工程序，但代码的读取方式还是取决于系统缓冲区的大小。对于程序量比缓冲区小的加工程序，可以一次直接读入内存；而程序量很大的程序，则需要分批读入。

系统事先分配一定的内存空间用于数据的存储，读取数据时根据程序的大小，决定一次读完还是分批读取。因此，需要对程序的结束标记、内存区间写满的标记以及内存半空标记进行扫描判别。对于较大的程序，第一次写满内存，插补程序读取一段程序段，此段占用的内存空闲出来，当内存有一半空闲时，设半空标记，继续从 U 盘读取程序直至空间再次写满为止。这样从 U 盘读数据

与其他任务（如插补计算、位置控制、前瞻处理等）是并行的。采用资源分时共享实现并行处理的方法保证雕刻机连续工作。

2.4.3 加工代码的处理

雕刻机数控系统在读取加工程序后，要进行代码的解释，并处理成为便于执行的代码。CAM 软件生成的加工程序分为 G 代码格式和 HPGL 格式两种，因此需要对两种格式的程序分别进行解释与处理。下面以 HPGL 格式的程序为例说明。

下面是一段文泰软件输出的 HPGL 格式的加工例程序：

```
SD30;SU60;  
PU10000,19600,-400;  
PD10000,19600,0;  
PD10000,19600,200;  
PD9764,19597,200;  
PD9528,19588,200;
```

其中：PU 表示抬刀空走，PD 表示落刀加工，它们后面的数据分别表示 X、Y、Z 三个方向的坐标脉冲数，SD 和 SU 后面的数据是对应的加工速度，

由于 CAM 软件生成的 HPGL 程序已经将轮廓描述用的毫米单位换算成脉冲当量数，加工坐标也已经过刀具半径补偿重新计算，数控系统只需要通过对读入的加工程序进行词法分析、语法分析，从而生成加工数据数组，该数组包含了插补所需要的坐标信息、刀具状态信息等有效信息。数据处理时若读取“PU”，则设标志 0，若读取“PD”，则设标志 1，这样插补程序从该数组中读取数据的同时也可以查出对应的加工速度。

控制程序读取并解释加工程序后，就进行前瞻处理、光顺处理以及插补处理，直至生成控制电机的信息。数控系统控制软件对数据处理的流程图如图 2-3 所示：

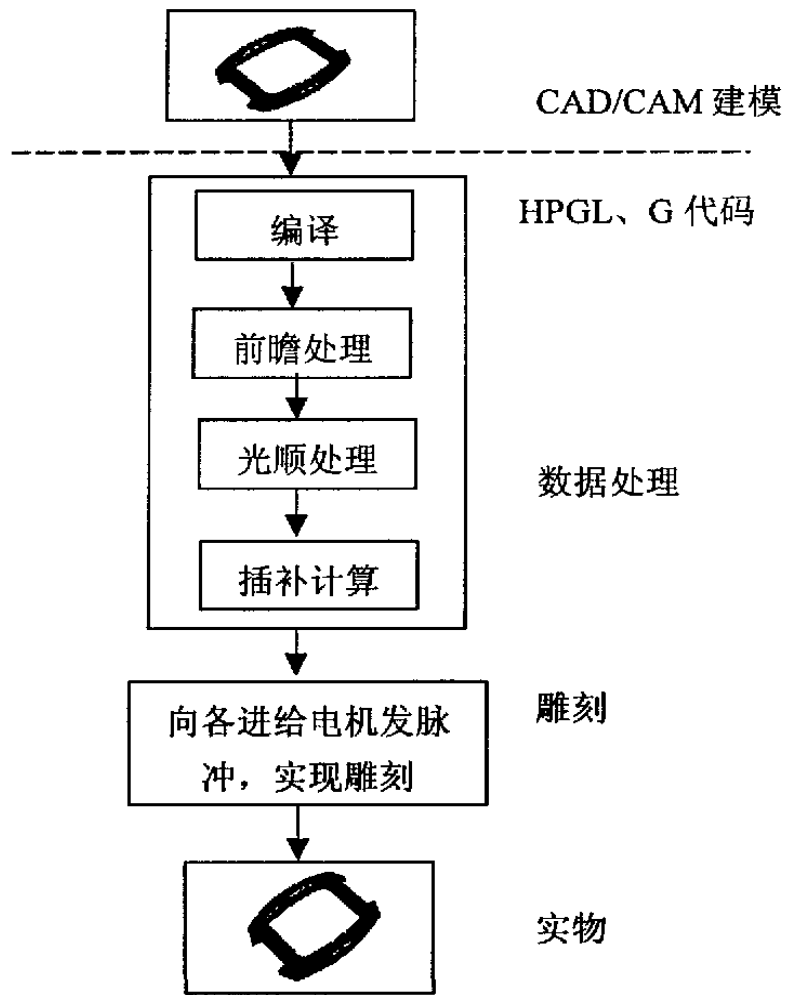


图 2-3 雕刻机数据处理流程

第三章 数控雕刻机的嵌入式系统及其控制软件开发技术的研究

数控雕刻机控制系统主要由程序、输入输出设备、计算机数控装置（CNC 装置）、主轴驱动装置和进给伺服驱动系统等组成一个整体的系统。该数控系统的核心是计算机数控装置（CNC 装置）。

3.1 嵌入式系统概述

随着后 PC 时代的到来，嵌入式系统已成为计算机业界的热点，信息家电、移动计算设备、网络设备、工业控制和仪器仪表、医疗设备、汽车、船舶、军事等众多领域都成了嵌入式系统的天下^[22]。

嵌入式系统（Embedded System）是当今最热门的概念之一，它在于结合微处理器或微控制器的系统电路与其专属的软件，来达到系统工作效率的最高比。单片机的应用是嵌入式系统应用的初级阶段^[23]。本文所开发的数控雕刻机控制软件就是基于 ARM 处理器的嵌入式系统软件。

3.1.1 嵌入式系统的概念与特点

嵌入式系统是计算机的一种应用形式，通常指嵌入在宿主设备中的微处理机系统，它所强调的要点是：计算机不为表现自己，而是辅助它所在的宿主设备，使宿主设备的功能智能化、网络化。据此，通常把嵌入式系统定义为一种以应用为中心，以计算机为基础，软硬件可以裁减，适用于系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗有严格要求的专用计算机系统。通常是一个包含机械、电子、计算机等多种工作部件的综合系统。

因此在嵌入式系统中，操作系统和应用系统常被集成于计算机硬件系统中，使系统的应用软件与硬件一体化。这样，嵌入式系统的硬件与软件需要高效率地协同设计，以做到量体裁衣、去除冗余，在同样的系统配置上实现更高的性能。

由于嵌入式处理器的特点以及系统的特殊构成，嵌入式系统与桌面计算机系统有着本质的区别，在很多方面独具特色。

（1）面向特定应用 桌面计算机常用于计算、管理、办公自动化等。而嵌入式系统常是一个面向特定应用的专用系统，对于具体应用，由于目的不同，对工作部件的要求也不一样。

（2）系统构成多种多样 嵌入式系统是一个集机械、电子、计算机为一体的软硬件综合系统。随着应用的变化，硬件可能包括 FPGA（Field Programmable

Gate Array 现场可编程门阵列)、ASIC (Application Specific Integrated Circuit 特定用途集成电路)、微处理器等多种可编程器件, 软件一般也是面向具体应用的专用软件, 一个系统的软件和另一个系统的软件可能完全不同。

(3) 体系结构千差万别 嵌入式系统体系结构要根据具体的应用确定, 对不同的应用对象, 不同的机械、电子部件要采用不同的体系结构。

(4) 设计方法不尽一致 嵌入式系统是一个软硬件结合的系统, 要求软件和硬件之间协调和统一, 因此在设计方法上应注重系统的协同设计。如最近几年流行的软硬件协同设计 (Hardware-Software Co-design) 就是要提高大型嵌入式系统的设计效率和质量。

(5) 人机界面要求不一 嵌入式系统的人机交互界面变化极大, 可能是一个发光二极管, 也可能是机器人视觉。

(6) 实时性要求较高 嵌入式系统一般都是实时系统, 这就要求系统对外部事件的反应要及时准确。即使在最坏的情况之下也能正常工作是嵌入式系统的基本要求。

(7) 可靠性要求较高 嵌入式系统对可靠性的要求与系统的规模和应用环境、目的有密切关系。系统可靠性涉及的问题很多, 机械系统的可靠性、计算机硬件、软件的可靠性都需要认真考虑。先进的设计技术和高质量的诊断检测系统尤为重要。

嵌入式系统还有其它如体积小、重量轻、低功耗等特点。总之, 全面考虑、正确处理各种因素的影响是嵌入式系统设计者应该重视的问题。

3.1.2 嵌入式系统的分类与构成

从体系结构上来看, 根据应用方式的不同, 可将嵌入式系统分为知识产权 (intellectual property, IP) 核级、芯片级和模块级等三种不同的体系结构形式, 它们均采用“量体裁衣”的方式, 把所需的功能或模块嵌入到各种应用系统或 IT 产品中^[22]。

IP 级: 通常 IP 核不仅指数字 IP 核, 同时也包括模拟 IP 核; 同时, IP 核还分为硬核、软核和固核。根据应用需求将不同的 IP 核集成在一块芯片上, 就形成了系统级芯片 SoC (system on chip) 的形式, 另外, 各种嵌入式软件也可以 IP 的方式集成在芯片中。

芯片级: 根据其发展现状, 常见的嵌入式芯片可以分为: 嵌入式微处理器 (EMPU)、嵌入式微控制器 (EMCU)、嵌入式 DSP 处理器、现场可编程外围芯片 (PSD)。

模块级: 将以 x86 处理器构成的计算机系统模块嵌入到应用系统中, 这样可充分利用 PC 机的资源, 尤其适用于工业控制和仪器仪表的应用中。

从具体构成来看，嵌入式系统包括硬件和软件两部分，硬件包括处理器/微处理器、存储器及外设器件和输入输出（I/O）端口、图形控制器等，软件部分包括操作系统软件（要求实时和多任务操作）和应用程序。虽然嵌入式系统的构成在具体应用中千差万别，但从整体来看，大致可以归结为图 3-1 所示的几个部分^{[24][26]}。

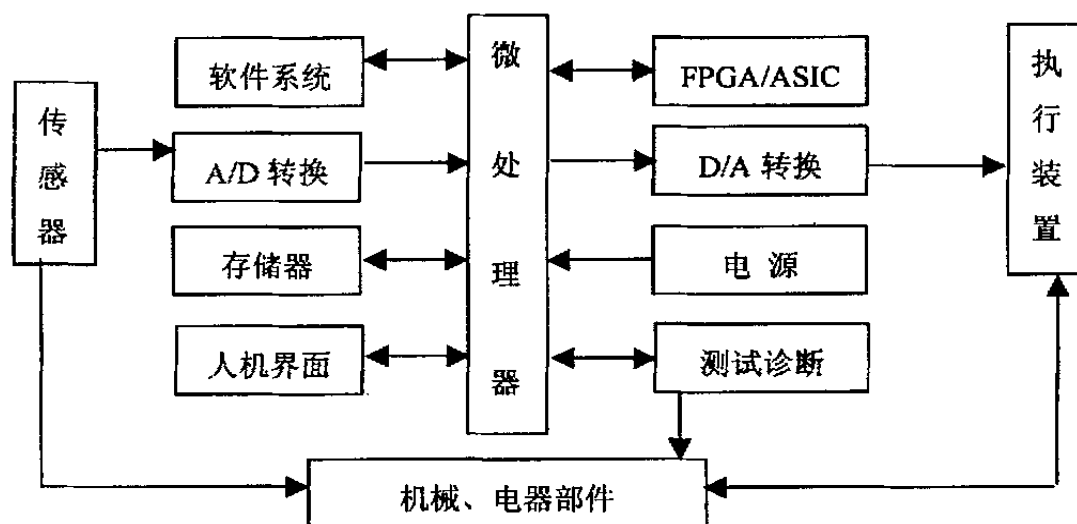


图 3-1 嵌入式系统构成

以下简单介绍其中主要的几个部件：

传感器：这是嵌入式系统感知外部环境的主要渠道，虽然不同的应用场合，传感器的性能、规模、形式都不一样，但其感知外部环境的基本功能却始终是一致的。

机械、电器部件：机械、电器部件可能是嵌入式系统中规模、体积最大的一部分。系统的具体功能往往通过它们最终实现。这一部分在构成、功能上的差异就更大了。

微处理器：这是嵌入式系统的核心部件之一，它负担着控制、协调系统工作的重要任务。

FPGA/ASIC：利用 FPGA/ASIC 实现系统的特殊功能是现代嵌入式系统设计的主要方法之一。由于 FPGA/ASIC 具有灵活、快捷、可靠等特点，使用它们一方面可以提高系统的灵活性和可维护性，另一方面也提高了系统开发的速度和质量。

软件系统：与桌面计算机相比，嵌入式系统软件一般都具有容量小、效率高等特点，同时，为了提高执行速度和可靠性，嵌入式系统软件一般都是固化在存储芯片上或微控制器内部。

执行装置：执行装置是微处理器控制命令的执行人，系统通过执行装置驱动机械、电器部件完成具体的工作和功能。如何使执行装置高效可靠地工作也是嵌入式系统设计的重要环节。

测试诊断：测试诊断功能是保证系统正常工作的重要保证。嵌入式系统的测试诊断功能不仅仅是对计算机系统的，而且是对整个工作系统的，包括机械、电器功能部件。

3.1.3 嵌入式系统的发展与趋势

嵌入式系统的发展有 30 多年的时间，大致经历了四个时期^[26]：以单芯片可编程控制器为核心的系统是第一阶段，第二阶段是以嵌入式 CPU 为基础、以简单操作系统为核心的系统，第三阶段是以嵌入式操作系统为标志的嵌入式系统，目前嵌入式系统正经历一个以 Internet 为标志的迅速发展的阶段，虽然目前大多数嵌入式系统还孤立于 Internet 之外，但随着 Internet 的发展以及 Internet 技术与信息家电、工业控制技术相结合日益密切，嵌入式设备与 Internet 的结合将代表着嵌入式技术的真正未来。

嵌入式系统有以下几个发展动向：

(1) 为设备网络通讯提供标准接口。针对外部联网要求，嵌入式系统必须配备 Ethernet 接口，相应需要 TCP/IP 协议支持，同时，还需具备 IEEE139、CAN 等通讯接口以及提供相应的组网协议软件和物理层驱动软件。

(2) 支持小型电子设备，实现小尺寸、低功耗和低成本。为满足这种特性，要求嵌入式产品设计者相应降低处理器的性能，限制内存容量和复用接口芯片，这就相应提高了对嵌入式软件设计技术要求。如：选用最佳的编程模式和不断改进算法，采用 EC++ 编程模式，优化编译器性能。

(3) 提供精巧的人机界面。

(4) 发展影响深远的软件新技术。这些技术包括：行业性编程接口 API 规范、无线网络操作系统、IP（知识产权）构件库和嵌入式 JAVA 等。

3.2 基于 ARM 处理器的嵌入式系统软件开发技术

3.2.1 ARM 嵌入式处理器介绍

嵌入式系统的核心是嵌入式处理器，嵌入式微处理器有许多流行的处理器核，芯片生产厂家一般都是基于这些处理器核生产不同型号的芯片。目前世界上常用的几种处理器核有：ARM/StrongARM、MIPS、PowerPC、x86、68K/Codefire 等^[26]。嵌入式处理器一般具有以下 4 个特点：

1) 很强的实时多任务处理能力 能完成多任务并且有较短的中断响应时间，从而使内部的代码和实时内核的执行时间减少到最低限度。

2) 具有功能很强的存储区保护功能 嵌入式系统的软件结构已模块化, 而为了避免在软件模块之间出现错误的交叉作用, 需要设计强大的存储区保护功能, 同时也有利于软件诊断。

3) 可扩展的处理器结构 能最迅速地开发出满足应用的嵌入式微处理器。

4) 嵌入式处理器功耗很低 尤其是用于便携式的无线及移动的计算和通讯设备中靠电池供电的嵌入式系统更是如此, 如需要功耗只有 mW 甚至 μ W 级。

本嵌入式系统采用的是基于 ARM 的嵌入式开发平台, 主要基于以下原因:

1) 处理速度快。ARM 是 RISC 结构的处理器, 而且 ARM 内部集成了多级流水线, 如 ARM7 中使用 3 级流水线, 大大增加了处理速度。

2) 超低消耗。

3) 应用前景广泛。

4) 价格低廉。

3.2.2 嵌入式程序开发过程

不同于通用计算机和工作站的软件开发过程, 一个嵌入式程序的开发过程具有很多特点和不确定性。其中最重要的一点就是软件与硬件的紧密耦合特性 [27-28]。

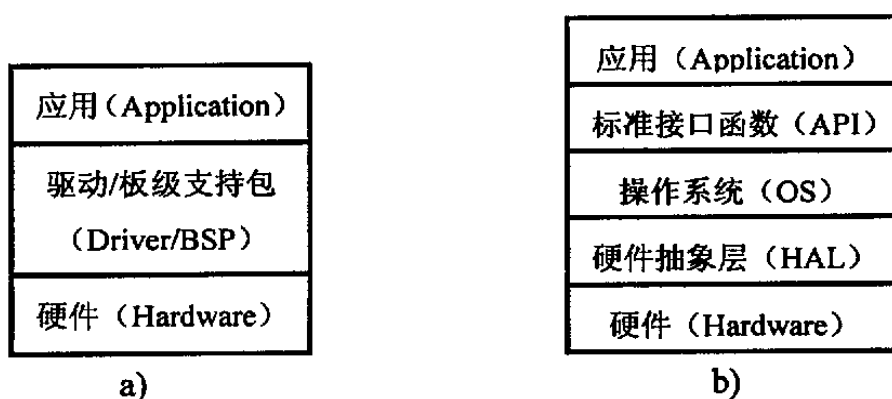


图 3-2 两类不同的嵌入式结构模型结构

a) 不带操作系统支持

b) 带操作系统支持

图 3-2 是两类简化的嵌入式系统层次结构图。由于嵌入式系统的灵活性和多样性, 上面图中各个层次之间缺乏统一的标准, 几乎每一个独立的系统都不一样。这就给上层的软件设计人员带来了极大的困难。第一, 在软件设计过程中过多地考虑硬件, 给开发和调试都带来了很大不便; 第二, 如果所有的软件工作都需要在硬件平台就绪之后进行, 自然就延长了整个的系统开发周期。

为了解决这些问题, 首先在设计应用与驱动 (图a)、或API (图b) 之间的接口, 可以设计成相对统一的一些接口函数, 这对于具体的某一个开发平台或在某个公司内部, 是完全做得到的。这样一来, 就大大提高了应用层软件设计的标准化程度, 方便了应用程序在跨平台之间的复用和移植。

对于驱动/硬件抽象这一层，因为直接驱动硬件，其标准化非常困难甚至不太可能，但是为了简化程序的调试和缩短开发周期，可以在特定的 EDA (Electronic Design Automatic, 电子设计自动化) 工具环境下进行开发，通过后移植到硬件平台上工作，这样既可以保证程序逻辑设计的正确性，同时使得软件开发可平行甚至超前于迎接开发进程。

我们把脱离于硬件的嵌入式软件开发阶段称为“PC 软件”的开发，可以用下面的图来示意一个嵌入式系统程序的开发过程。

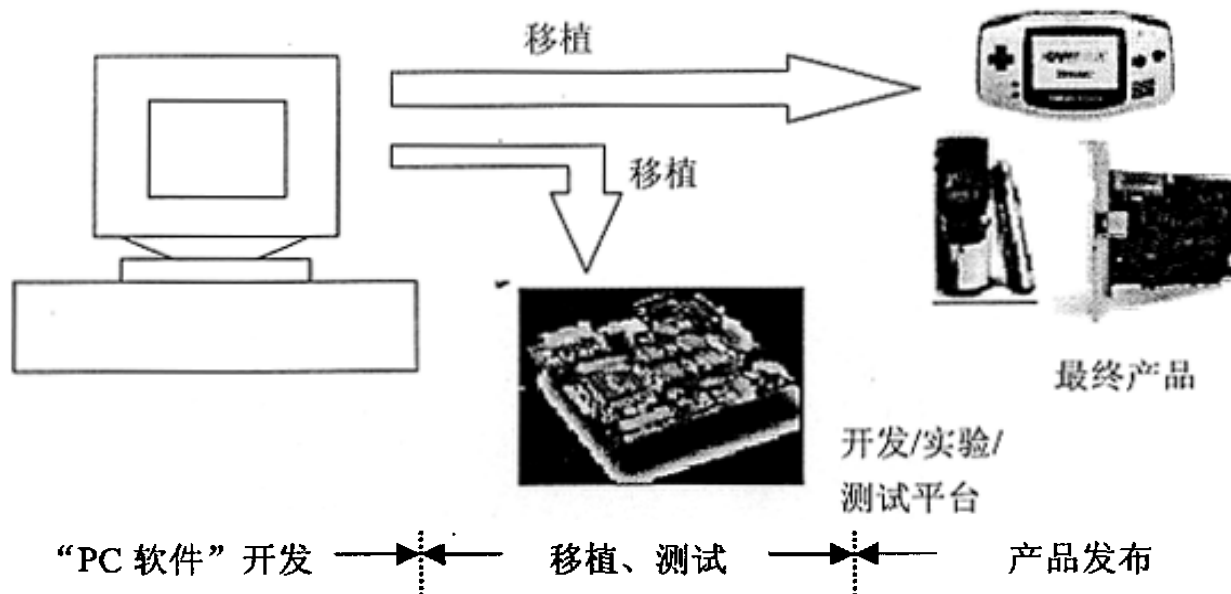


图 3-3 嵌入式系统产品的开发过程

在“PC 软件”开发阶段，可以用软件仿真，即指令集模拟的方法，来对用户程序进行验证。当完成一个“PC 软件”的开发之后，只要进行正确的移植，一个真正的嵌入式软件就开发成功了。

3.2.3 基于 ARM 的嵌入式系统软件设计要点

ARM 处理器本身是 32 位设计，但也配备 16 位指令集 Thumb，允许软件编码为 16 位指令。本文所开发的数控雕刻机控制系统采用的是低功耗的 32 位 ARM7 系列处理器。以下简要介绍基于 ARM 的嵌入式软件开发的几个方面。

(1) 系统的初始化过程 基于 ARM 的芯片多数是复杂的片上系统集成 (SoC)，在应用程序启动之前，需要有专门的一段启动代码来完成对系统的初始化。系统启动程序所执行的操作跟具体的目标系统和开发系统相关，一般通用的内容包括：中断向量表，初始化存储器系统，初始化堆栈，初始化有特殊要求的端口、设备，初始化应用程序执行环境，改变处理器模式，呼叫主应用程序等。

(2) 如何满足嵌入式系统的灵活需求 由于嵌入式应用领域的多样性，每

个系统都具有各自的特点，在进行系统程序设计时，一定要进行具体分析。下面是几个常见的要点：从存储器开销和性能要求两方面加以考虑是选择 ARM 还是 Thumb；堆栈的分配，出于系统整体性能考虑，要给堆栈分配相对访问速度最快、数据宽度最大的存储器空间；确定 ROM 还是 RAM 在 0 地址处；存储器地址重映射（memory remap），根据目标存储器系统分散加载映像（scatterloading）。

（3）异常处理机制的设计 要注意的内容包括：异常响应流程，异常处理函数的设计，ARM 处理器对异常处理函数的扩展，软件中断处理，可重入中断设计。

（4）ARM 与 Thumb 的交互工作。

此外，在设计嵌入式程序时还要注意变量定义，参数传递，循环条件，条件执行，混合编程，优化代码等等。

3.3 数控雕刻机控制软件设计

数控系统的软件结构是指数控系统软件的系统任务划分方式、组织管理方式、任务调节机制、任务间信息交换机制以及系统集成方法等。软件结构解决的问题是如何组织和调控数控系统各个任务的执行，使之满足一定的时序配合要求和逻辑关系。因此，在开发数控系统时，合理确定系统的软件结构是非常重要的。

3.3.1 数控系统控制软件结构概述

在 CNC 系统中，软硬件功能的划分对于系统的性能和成本具有极重要的影响，软件和硬件各有特点：硬件处理速度快，造价相对较高，但适应性较差；软件设计灵活、适应性强，但处理速度一般比硬件慢。实际上，现代 CNC 中软、硬件的分界并不是固定不变的，而是随着软、硬件的水平和成本，以及 CNC 所具有的性能不同而发生变化的，图 3-4 给出了不同时期和不同产品中的三种典型 CNC 软、硬件界面^[3]。

同时，随着 CNC 系统性能与功能的要求日益复杂化，软件开发的成本急剧增加，微处理器速度大幅度提高，实时多任务操作系统已成为 CNC 软件的基本核心要求。CNC 装置的系统软件是一个专用实时操作系统，由于其应用领域是数控加工，因此，必须满足该领域对控制系统的要求。下面我将分析目前 CNC 装置软件结构的特点和其结构模式。

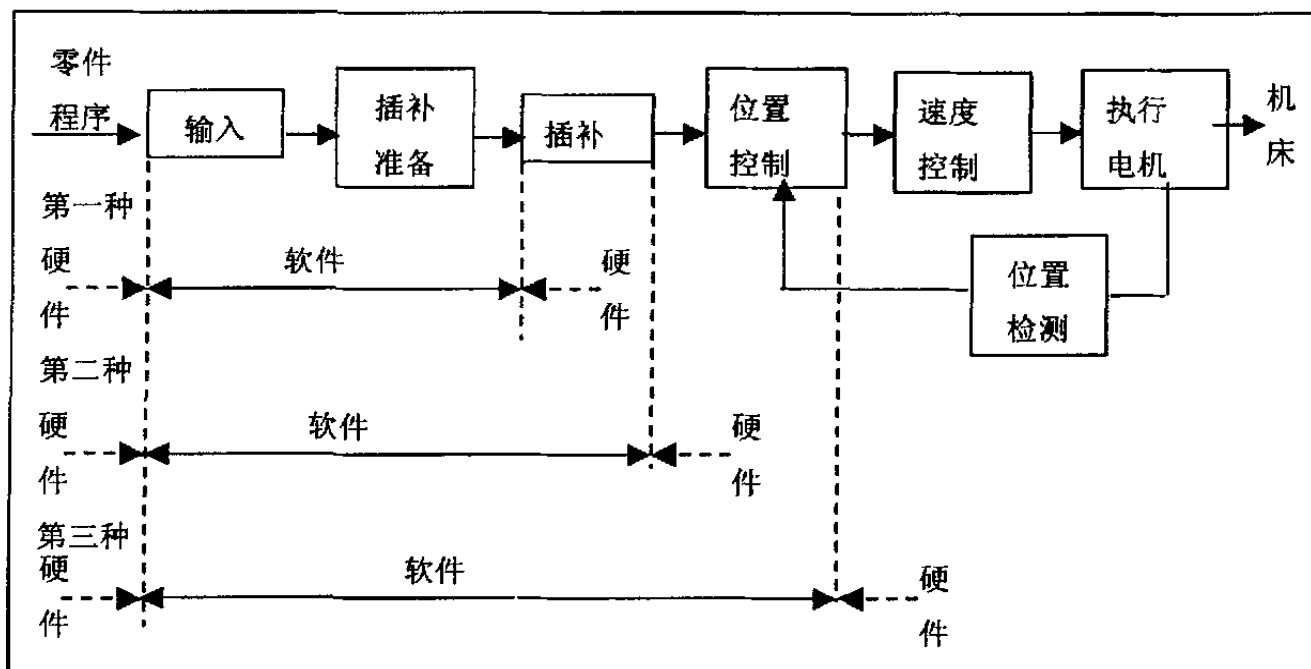


图 3-4 CNC 中三种典型的软硬件功能界面

（一）CNC 软件结构特点^[3]：

（1）CNC 装置的多任务性 CNC 的任务通常可以分为两类：管理任务和控制任务。管理任务主要承担系统资源管理和系统各子任务调度，负责系统程序管理、显示、诊断等子任务；控制任务主要完成 CNC 的基本功能：译码、刀具补偿、速度预处理、插补计算、位置控制等。CNC 装置在工作中这些任务不是顺序执行的，而往往需要多任务并行处理，通常采用基于并行处理的多任务调度技术（软件系统在同一时刻或同一时间间隔内完成两个或两个以上任务处理的方法）。并行处理的实现方法是与 CNC 系统的硬件结构密切相关的。对单 CPU 的 CNC 装置，采用“资源分时共享”方法：循环调度和优先抢占调度相结合的方法；对多 CPU 结构的 CNC 装置，采用并行处理和流水处理方法。

（2）CNC 系统的实时性 实时性是指某任务的执行有严格的时间要求，即必须在系统的规定时间内完成，否则将导致执行结果错误和系统故障。CNC 装置是一个专用的实时系统，该系统各任务的实时性要求各不相同。从各任务对实时性要求的角度看，它们基本上可以分为强实时性任务和弱实时性任务。强实时性任务又可以分为实时突发性任务和实时周期性任务，如系统警报属于实时突发性任务，插补控制属于实时周期性任务。为了满足 CNC 装置实时任务的要求，系统的调度机制必须能根据外界的实时信息以足够快的速度（在系统规定的时间内）进行任务调度，优先抢占调度机制就是能满足上述要求的调度技术，它是一种基于实时中断技术的任务调度机制。在 CNC 系统中任务的调度机制除优先抢占调度外，往往还同时采用时间片轮换调度和非抢占优先调度。

（二）CNC 装置软件结构模式

目前，CNC 装置软件的结构模式有如下几种。

(1) 前后台型软件结构模式

这种模式将数控系统分为两部分：前台程序和后台程序。前台程序是实时中断服务程序，用来完成数据采集、伺服控制等实时性要求高的任务。后台程序（背景程序）是一个循环程序，用来完成人机界面管理、通讯、动态显示和图形仿真等弱实时性的任务，其在运行过程中不断被前台中断服务程序打断。系统通过前后台程序相互配合来完成加工任务。这种软件结构模式采用的任务调度机制是优先抢占和顺序调度。

(2) 中断型软件结构模式

这种模式将初始化程序之外的整个系统软件分成许多任务模块，并且将它们分别安排在不同优先级的中断服务程序中，然后由中断管理系统（包括硬件和软件组件）对各级中断服务程序实施调度管理。整个软件是一个大的中断管理系统，采用优先抢占调度机制。

(3) 基于实时操作系统的结构模式

实时操作系统是操作系统的重要分支，具有任务管理、多种实时任务调度机制、任务间的通讯机制等功能。实时系统能及时响应外部事件的请求，在规定的时间内完成该事件的处理，并控制所有实时任务协调一致地运行。因此数控系统的软件完全可以在实时操作系统的基础上进行开发。

目前采用该模式开发的方法有两种：一种是在商品化的实时操作系统下开发数控系统，国外许多著名的数控系统厂家采用这种方法；另一种是在通用的 PC 操作系统 DOS、Windows 等平台上开发。由于 DOS 是单用户单任务操作系统，不具备实时多任务的能力，但是通过分时共享和中断技术可以解决并行多任务的问题，国内许多数控系统就是基于 DOS 平台的。Windows 是典型的多任务操作系统，但是实时性差。不适合作为数控系统的操作系统平台。

(4) 实时多任务嵌入式操作系统的结构模式

目前用于数控系统的嵌入式操作系统有 WindowsCE 和 $\mu\text{C}/\text{OS}$ 等。WindowsCE 是一种 32 位保护模式的嵌入式操作系统。而 $\mu\text{C}/\text{OS II}$ 是源码公开的多任务实时嵌入式操作系统，是为嵌入式应用编写的通用软件，采用抢占式的实时内核，除了多任务的优点外，还提供了任务管理、时间管理、内存管理以及资源管理（任务之间的通讯与同步）四大功能，以及许多系统服务如信号量、邮箱、时间函数等，这些功能可以根据不同的需求进行裁减。 $\mu\text{C}/\text{OS II}$ 是一个具备现代操作系统特点的 RTOS (Real Time Operating System)，同时它结构清晰、注解详细，具有良好的可扩展性和可移植性，已广泛应用于各种实时嵌入式系统之中^[27-28]。

雕刻机是实时多任务的机电产品，其实时性要求较高。对比各实时多任务嵌入式操作系统，由于 $\mu\text{C}/\text{OS II}$ 源码公开，可移植性强，而且代码量小，因此在开发基于嵌入式系统的数控雕刻机时，采用的即是 $\mu\text{C}/\text{OS II}$ 嵌入式操作系统，

能够满足雕刻机实时要求，便于任务分配与管理。

3.3.2 雕刻机数控系统控制软件结构设计

数控系统是由各个功能模块组成的，而每个模块都是由功能相互独立的子功能对象按一定的逻辑关系组成的。为了建立 CNC 系统的参考结构，必须对数控系统的功能和用户的需求进行详细全面的分析，总结现有系统控制结构共同概念，形成各种子功能模块的共性和个性。

由于 $\mu\text{C}/\text{OS II}$ 操作系统基于任务切换机制，需要将雕刻系统各功能模块按其之间的逻辑关系划分成几个不同的任务，由操作系统完成对各个任务的管理。通过任务的划分，在操作系统的管理之下，各任务协调有序地执行，从而实现软件的控制功能。

通过对雕刻系统功能模块的分析，可以将软件功能划分成如下几个任务：人机界面、CAM/CNC 接口、基本控制等。其中人机界面任务主要包括：界面菜单操作的响应、键盘操作的响应等。CAM/CNC 接口任务主要包括：CAM 与 CNC 之间的数据交流等。基本控制任务主要完成对机床的控制，如插补计算、进给速度控制和位置控制等。

3.3.3 雕刻机数控系统控制软件功能模块设计

本雕刻机控制系统是基于 $\mu\text{C}/\text{OS II}$ 操作系统开发的嵌入式数控系统。其软件结构如图 3-5 所示。该系统以嵌入式操作系统为核心，在一个开放式的数控平台上，进行二次开发，实现雕刻机的各项功能。

一、软件结构说明

在嵌入式操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS II}$ 的管理之下，对三大任务模块进行管理调度：人机界面模块、基本控制模块、CAM/CNC 接口模块。基本控制模块管理 CNC 所有外部控制对象，包括设备驱动程序的管理、位置控制、插补运算等，是 CNC 控制的核心部分。CAM/CNC 接口模块管理 CAM 生成的加工程序与 CNC 之间的传送方法（通过 USB，RS232 等）与数据处理。人机界面模块是提供用户操作和使用数控系统的功能单元。

CAM/CNC 接口模块和人机界面模块分别通过各自不同的接口程序与基本控制模块进行联系。三者之间的通讯与调度均在操作系统的管理之下完成。

如果数控系统功能需要增减，只要在相应的任务中进行模块的添加与删除，便可实现系统的多功能和多样化，从而使系统具有开放性和可扩充性。

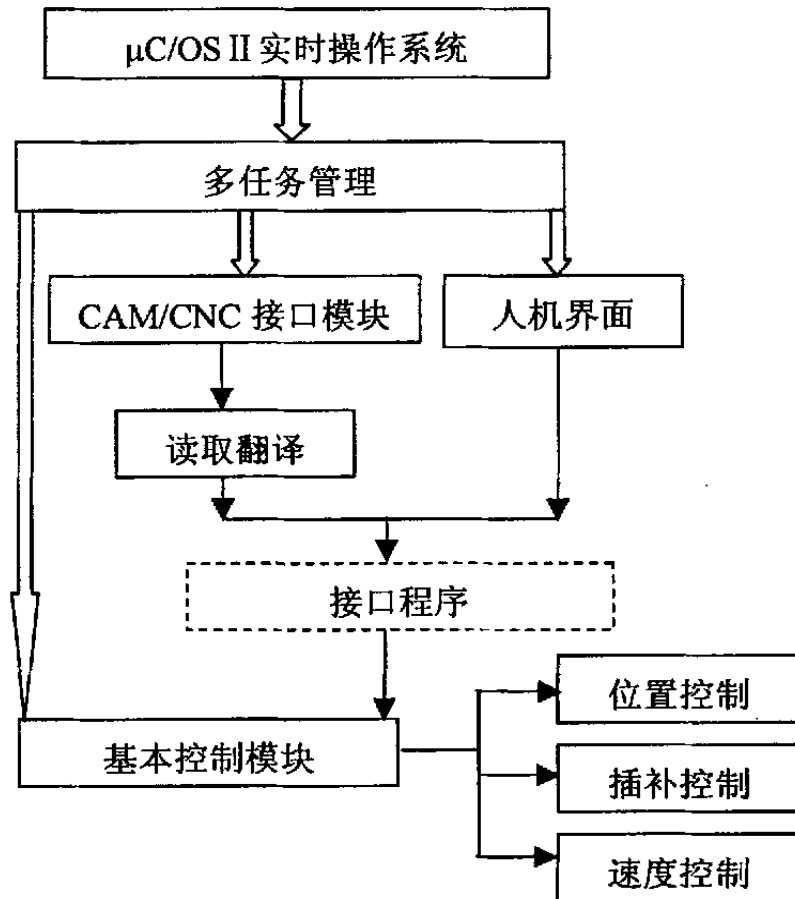


图 3-5 雕刻系统软件结构

二、软件各主要功能的实现

1、人机界面功能 根据数控雕刻机的功能要求，设计人机界面操作菜单，为用户提供操作和使用数控系统的环境。人机界面主界面设计如图 3-6 所示。

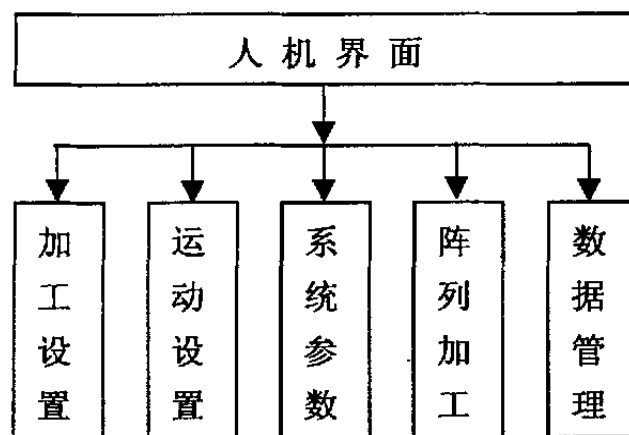


图 3-6 雕刻系统人机界面设计

主界面主要包括五项内容：加工设置、运动设置、系统参数、数据管理以及阵列加工。其中加工中经常需要使用的是：加工设置主要是对加工速度倍率、主轴延迟时间等进行设置；而运动的设置则主要是对各种运动参数如运动限制、加速度等；阵列加工则是在阵列加工时，用来对阵列的行列数进行设置的。

2、基本控制功能 此模块包括速度预处理、插补计算控制以及对伺服电机的运动控制等。采用“前瞻”功能的速度预处理技术，直接函数插补计算和微线段光滑处理技术等，详见第四、第五章。

3、CAM/CNC 接口模块 目前数控机床仍使用手工编程，但一些零件的 NC 加工程序用手工难以完成，特别是一些复杂零件几乎不可能用手工编程完成。随着计算机技术的发展逐步出现了以微机为平台的 CAD/CAM 系统。CAM/CNC 接口使得数控系统能充分利用现有的 CAD/CAM 技术，与其更好的兼容。

目前数控机床的编程有手工编程、计算机辅助编程和 CAD/CAM 一体化编程等方法，数控雕刻机的编程采用的是 CAD/CAM 一体化编程，常用的 CAD/CAM 软件有文泰软件、北京精雕公司的 JDPaint 等。

第四章 雕刻机插补计算方法

4.1 插补技术

4.1.1 插补的基本概念

众所周知，零件的轮廓形状是由各种形状（如直线、圆弧、螺旋线、抛物线、自由曲线等）构成的。其中最主要的是直线和圆弧。用户在零件加工程序中，一般仅提供描述该线形所必需的相关参数，如对直线，提供其起点和终点；对圆弧，提供起点和终点、顺圆或逆圆以及圆心相对于起点的位置。因此，为了实现轨迹控制必须在运动过程中实时计算出满足线型和进给速度要求的若干中间点（在起点和终点之间）。这就是数控技术中插补（Interpolation）的概念。据此，对插补定义如下：所谓插补就是根据给定进给速度和给定轮廓线型的要求，在轮廓的已知点之间，确定一些中间点的方法，这种方法称为插补方法或插补原理。而对于每种方法（原理）又可以用不同的计算方法来实现，这种具体的计算方法称之为插补算法。

插补结果必须不仅能精确描述期望的坐标轴运动路径，也必须保证伺服系统能获得高速平稳的跟随控制。具体而言，就是如何确定出机床各坐标轴伺服系统在每个采样周期的指令参考点，以驱动坐标轴产生协调运动，从而获得刀具相对于工件的理想运动。

对于轮廓控制系统来说，最重要的功能便是插补功能，这是由于插补运算是在机床运动过程中实时进行的，即在有限的时间内，必须对各坐标轴实时地分配相应的位置控制信息和速度控制信息。轮廓控制系统正是因为有了插补功能，才能加工出各种形状复杂的零件。可以说插补功能是轮廓控制系统的本质特征。因此，插补算法的优劣，将直接影响 CNC 系统的性能指标^[3]。

4.1.2 插补的分类

插补方法的分类通常作如下划分^[31-34]：

（一）一次插补器、二次插补器和高次插补器

这是根据加工图形的几何模型来划分的，如直线插补就是一次插补，圆弧或抛物线插补就是二次插补等。

（二）硬件插补和软件插补

硬件数控的插补器通常由数字电路构成，速度较快，但升级不易，柔性较

差，称为硬件插补。最早的数控插补均采用硬件来完成。

随着计算机技术的发展，计算机数控（CNC）的出现，插补功能逐渐由软件来实现，速度虽然没有硬件插补快，但容易升级，成本也较低廉，可以实现较复杂的插补算法。

为了减轻计算机的负担，提高插补速度，一般又将插补任务分为两部分，分别由计算机软件和硬件插补器来完成。这就是目前数控系统中采用的软/硬两级插补方案。软件插补部分称为粗插补，其任务是将路径规划中生成的曲线离散成满足精度要求的一段段直线或圆弧，以迎合硬件插补器的要求。粗插补一般在 CAM 软件中实现，生成的直线段和圆弧段通过编码送入 CNC 中，这种编码就是目前广泛使用的 G 代码。粗插补用直线段逼近非圆曲线，一般有三种方式^[31]：切线逼近法（如图 4-1a）、弦线逼近法（如图 4-1b）和割线逼近法（如图 4-1c），弦线逼近法因计算简单而得到广泛应用，其常用算法又可以分为等间距法、等程序段法和等误差法等。

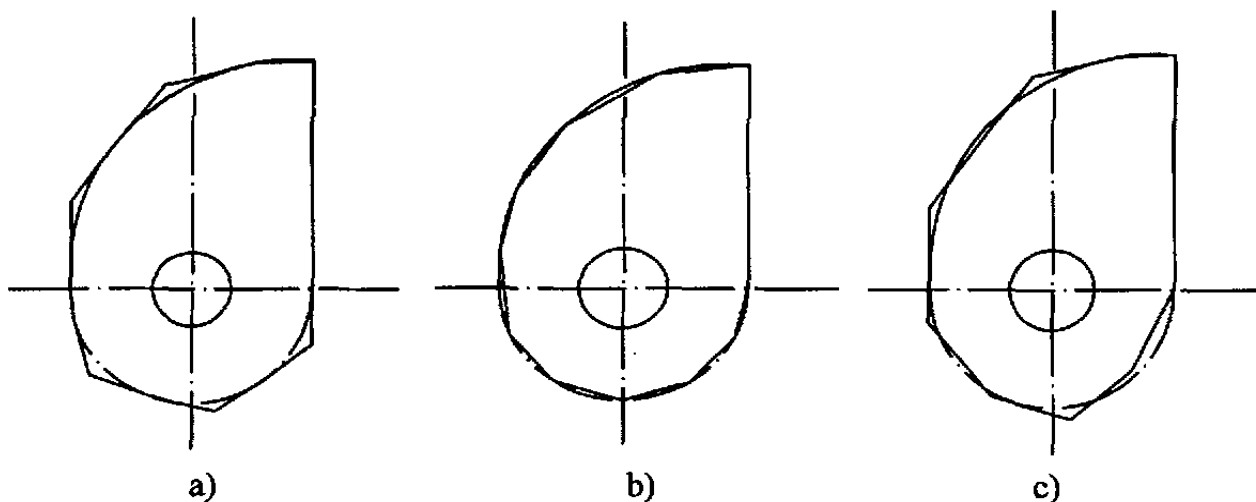


图 4-1 粗插补

a) 切线逼近法

b) 弦线逼近法

c) 割线逼近法

硬件插补又称为精插补。其作用是将粗插补生成的直线或圆弧根据进给速度的要求进一步细分，生成运动控制的参考点，以驱动执行机构运动。

这种方案通过软件和硬件来共同分担计算负荷。由于其所需的计算机容量和计算负荷小，这一方案一出现就受到了广泛的欢迎，目前大多数数控系统都采用的是这一种方案。但是这种方案粗插补（在 CAM）与精插补（在 CNC）中是两个独立的部分，其中的连接通过 NC 代码（如图 4-2），在 CAM 端首先进行编码，到达 CNC 端后进行译码，从而存在很多冗余环节。并且由于分割得到的直线段之间相互独立，在每一个直线段中均存在加减速，使得进给速度不平滑；直线段在精插补的过程中不可能刚好被单位进给量分割，因而在每一个程序段的终点有一定的速度突变。

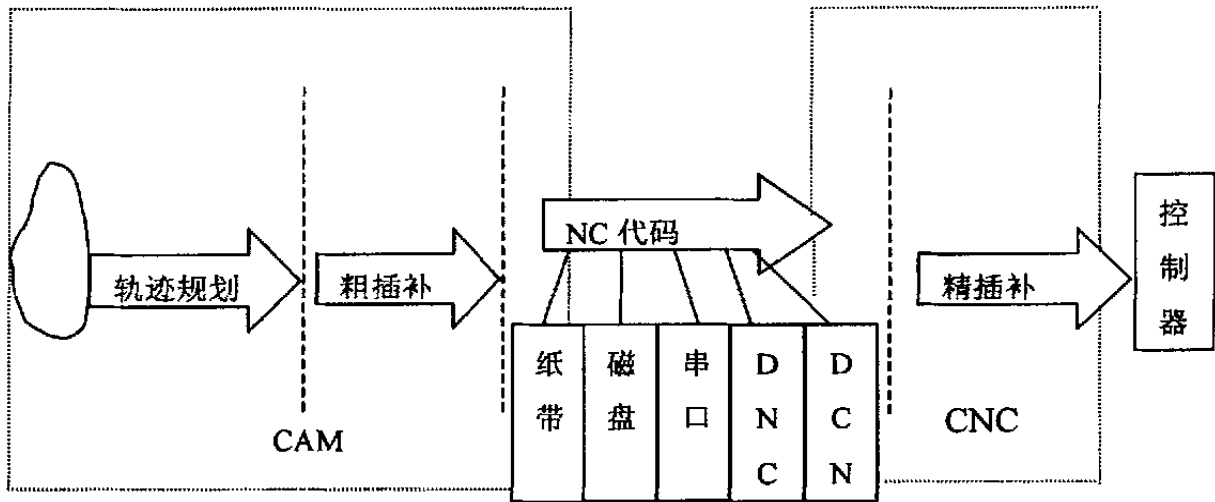


图 4-2 数控加工中数据流动方式

(三) 脉冲增量插补和数据采样插补

这是从插补算法上进行的分类。这两种方法目前广泛应用在各种数控系统中。二者的比较如图 4-3 所示。

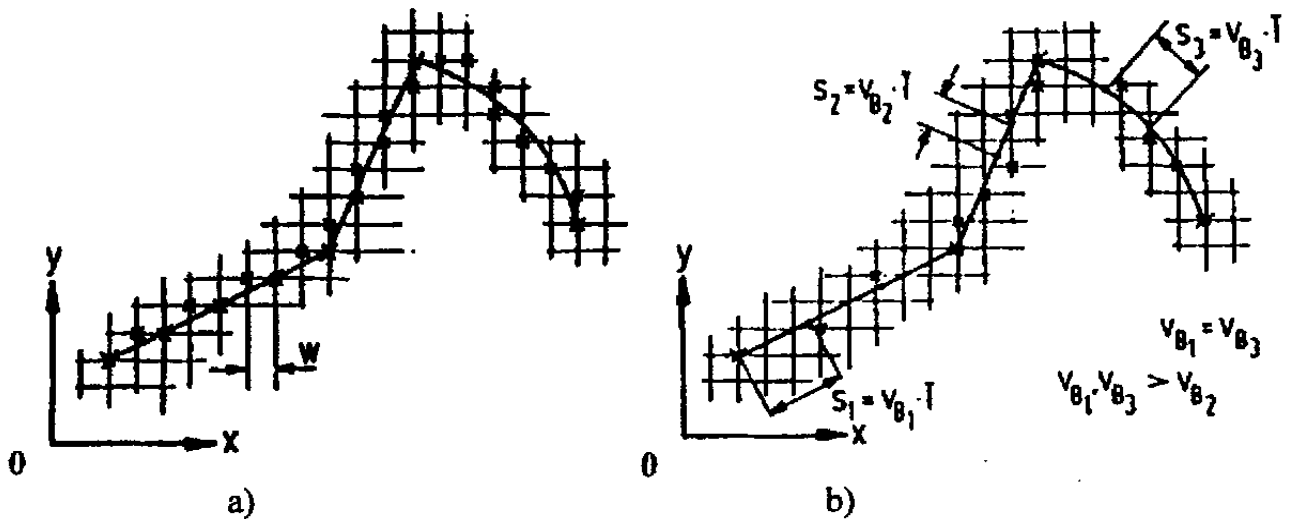


图 4-3 脉冲增量插补与数字增量插补对比

a) 脉冲增量插补

b) 数字增量插补

1、脉冲增量插补^{[3][35]} 又称基准脉冲插补或行程标量插补。其特点是：每次插补的结果是仅产生一个单位的行程增量（一个脉冲当量）（如图 4-3a 所示），以一个脉冲的方式输出给步进电机，其基本思想是：用折线来逼近曲线（直线）；插补速度与进给速度密切相关，而且还受到步进电机最高运行频率的限制；实现方法比较简单，通常仅用加法和移位算法就完成了插补，容易用硬件实现。而且，用硬件实现运算速度很快，也有用软件来完成的。脉冲增量插补一般用于一些中等精度（0.01mm）和中等速度（1~3m/min）要求的开环控制系统中。

实现脉冲增量插补的算法很多，常用的算法有：

- 1) 数字脉冲乘法器（又：二进制比例乘法器 BinaryRateMultiplier，简称 BRM）

- 2) 逐点比较法 (又称区域判别法)
- 3) 数字积分法 (简称 DDA 法)
- 4) 矢量判别法
- 5) 比较积分法
- 6) 最小偏差法
- 7) 目标点跟踪法

2、数字增量插补 又称数据采样插补或时间标量插补。特点是数控装置产生的不是单个脉冲而是二进制数, 适合于闭环、半闭环交、直流伺服电机驱动的系统。这种方法是把加工一段直线或圆弧的整段时间细分为许多相等的时间间隔, 称为插补周期, 经过一个单位时间间隔进行一次插补计算, 算出在这一时间间隔内各坐标轴的进给量, 边计算边加工, 直至加工终点。

常用的数字增量插补有:

- 1) 直接函数法
- 2) 扩展 DDA 法
- 3) 二阶递归扩展 DDA 法
- 4) 双数字 DDA 法
- 5) 角度逼近圆弧插补法
- 6) 改进吐斯丁法

4.1.3 插补技术的发展及现存的问题

插补技术是数控核心技术之一, 插补精度和速度直接影响加工精度和加工效率。随着数控技术的发展, 插补技术也经历了从单纯硬件插补的 NC 阶段到软硬结合的 CNC 两级插补阶段。

目前的数控系统中, 其主要轨迹控制功能仍为直线插补和圆弧插补。随着 CNC 数据处理能力的提高, 一些 CNC 系统增加了一些特殊曲线的处理能力, 如 FANUC 15M 等增加了渐开线、极坐标、圆柱插补等二维功能, 在三维上扩充了三次样条曲线功能^[36-37]。在曲线的实时插补算法方面, 近年来也获得了很大进展。S.Bedi 给出了一个样条曲线插补器^[38], M.Shpitalni 研究了任意隐式曲线和参数曲线的实时插补算法^[39], 华中科技大学的叶伯生、杨叔子等研究了三维抛物线、三次参数样条曲线插补, 并用于华中 I 型 CNC 上。另外还有五轴空间圆弧插补算法, NURBS 曲线插补算法等。

但这些研究只是在插补曲线种类上有所增加, 而没有改变数控系统只具有“点”、“线”级几何控制能力^[40], 曲面加工通常采用离线编程产生曲线, 再送到插补器插补。由于这种形式的插补器仅具有“线”级插补功能, 因而现行插补方法在实现高速高精度加工时存在着一些难以解决的问题:

1、难以实现真正的高速高精度 由于 CNC 输入的是离散直线和圆弧，缺乏具体的形状信息，高速运行时，除繁重的代码传输、解释任务外，还需按照预测轨迹形状，实现高速进给下的速度平滑过渡，由于计算工作量很大，程序运行周期延长，降低了运行速度；每一直线段加工时需要经过加速和减速过程。若提高曲面离散精度则必然带来大的程序量和计算量，因而加工速度无法提高；若要求高的加工速度，则无法保证高的加工精度。因此现行的插补方法无法同时保证曲面离散精度和加工速度。

2、加工程序过于庞大，通讯可靠性难以保障 加工时，零件允许误差小，因而逼近步长短，行距小，这就导致了零件程序十分庞大，不仅给 CAD/CAM 系统造成极大的负担，而且在通讯传输上也容易出现错误，增加了带来错误的风险。而且程序量大，难以一次装入 CNC 系统内存，对通讯速度和可靠性都提出了更高的要求。

3、不便于干预加工过程 零件程序是根据给定的刀具和工件数据如残余高度、加工余量等由 CAM 生成，刀具尺寸变化或加工余量改变使数控程序无法使用，需重新编程。同时由于不能实现三维刀具补偿，在曲面加工特别是一些模具型面、叶片类零件的加工时，由于零件表面硬度高，刀具磨损快，需要备用多把刀具。

4、不能实现刀具轨迹实时跟踪显示 因为零件程序是由直线和圆弧组成，已不包含零件型面的信息，因此不可能实现加工过程的跟踪显示。

5、冗余环节多，可靠性低 按现行加工模式进行曲面加工，整个过程冗余环节多，不仅需耗费大量的人机时间，占用较多的软硬件资源，而且需对大量数据进行多次编码、解码、传递、存储和处理，大大增加了出错的频率，对数控加工的可靠性造成不利影响。

鉴于现行曲面加工模式存在的种种问题，必须提高 CNC 系统的插补能力，使其具有“面”级插补功能。国内外对曲面插补技术的研究已经取得一些成果，如 S.Bedi 于 1993 年研制了一个具有样条曲面插补功能的 CNC 实验系统^[40]，华中理工在我国首次提出曲面直接插补，并在以工控机为硬件平台的单 CPU CNC 系统上实现，但系统未能实现实时干涉处理和对组合曲面的直接插补^[42-44]。同国外相比，我国在曲面插补技术上方面还存在很大的差距。

曲面实时插补可以解决数控系统中线级控制能力无法解决的问题，但从实质上看，曲面插补只不过是将原先在 CAM 中进行的曲面刀具轨迹规划部分移入了 CNC 中，这对数控机床操作者来说，数控编程变得相当简单，但对于 CNC 来说，计算负担却更加重了。面对如此繁重的计算任务，目前大多数系统都采用了多 CPU 体系结构进行处理。尽管如此，插补周期的选择仍然受到了很多的限制。

6、数控系统的插补频率太低 对于一般雕刻机的数控系统，特别是采用步

进电机的数控系统，进给速度和加工精度受插补周期的限制，若要保证精度和低速时一样又期望获得高的进给速度，必须缩短插补周期。若插补周期不变，而提高进给速度，获得精确位置跟踪的能力就会下降，在实际中表现为“跟随误差”或“轮廓误差”增大；因此，既要保证高速进给，又要保证高精度，大幅度提高插补频率是关键，但过高的插补频率是不合理的。由于目前数控系统的插补计算必须在线实时完成的，在一个插补周期内除了要完成插补运算外，还必须实时地完成其它如显示、监控等一些工作，在现有数控硬件平台上要实现这样短的插补周期很困难，也增加了单位时间内的数控系统的计算负担^[45]。

4.2 数控雕刻机对插补算法提出的要求

数控雕刻机与数控铣床的加工原理相似，因此研制雕刻机，尤其是研制高速高精度雕刻机就要对插补算法提出更高的要求。数控雕刻机与高速数控设备一样，要求采用的插补算法可以实现高速高精度加工，同时考虑到雕刻机的成本较低，插补算法等控制功能尽可能由软件实现，故算法不宜过于复杂，并容易实现。

4.3 直接函数计算插补方法

现有雕刻机的插补方法通常采用的是逐点比较法，每走一步都要和给定的轨迹比较，根据比较的结果决定下一步移动的方向，通常应用于步进电机控制的开环系统当中。该方法每计算一次，只向进给坐标轴发一个行程单位脉冲增量，进给速度受插补频率的限制，无法满足高速高精度加工的要求。

而直接函数计算插补是数字增量插补的一种，在每个插补周期内根据进给速度计算出各坐标轴在下一个插补周期内的位移增量（数字量），这个位移量通常多于一个行程脉冲增量，因而采用这类插补算法时，可达到较高的进给速度，通常用于数控机床的闭环或半闭环控制系统。因此，在高速高精度数控雕刻机的控制系统中采用直接函数计算法。

4.3.1 直接函数计算插补基本原理

4.3.1.1 直线插补

在直接函数计算法中，假设直线段起点为 $P_a(x_a, y_a, z_a)$ ，终点为 $P_c(x_a+a, y_a+b, z_a+c)$ ，直线段采用参数方程表示如下：

$$\begin{cases} x = x_a + a\tau \\ y = y_a + b\tau \\ z = z_a + c\tau \end{cases} \quad 0 \leq \tau \leq 1 \quad (4-1)$$

其中, a, b, c 为三轴方向上的增量。

下面的讨论以 XOY 平面上的直线段为例。

在设计直线插补程序时, 为了简化程序的设计, 通常将插补计算坐标系的原点选在被插补直线段的起点, 如图 4-4 所示,

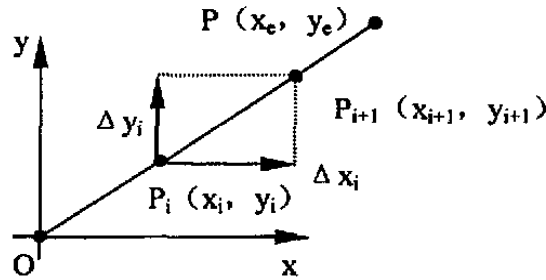


图 4-4 直线插补原理图

设有一直线段 OP , $O(0, 0)$ 为起点, $P(x_c, y_c)$ 为终点, 要求以速度 V (mm/min), 沿 OP 进给, 设系统的插补周期为 Δt (ms), 该段直线总的插补时间为 T (ms), 系统脉冲当量为 PLS 。设 $P_i(x_i, y_i)$ 为直线上某一插补点, 则下一点 $P_{i+1}(x_{i+1}, y_{i+1})$ 的坐标为

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + a\Delta\tau \\ y_{i+1} = y_i + b\Delta\tau \end{cases} \quad (4-2)$$

其中, $\Delta\tau$ 是 τ 在一个插补周期 Δt 内的增量。设 S 为该段直线的长度, 即 $S = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2}$, 而 $\frac{\Delta\tau}{1} = \frac{\Delta t}{T}$, $V = \frac{S}{T}$, 因此有 $\Delta\tau = \frac{V}{S} \Delta t$ 。 (4-3)

由于在时间 Δt 内, τ 有相同的增量 $\Delta\tau$, 因此插补合成速度恒定。

上述是二维直线的情况, 对于三维直线, 其插补计算式如下:

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i + a\Delta\tau \\ y_{i+1} = y_i + b\Delta\tau \\ z_{i+1} = z_i + c\Delta\tau \end{cases} \quad (4-4)$$

4.3.1.2 圆弧插补

若插补一段圆弧, 已知圆弧起点、终点、圆心坐标 (x_m, y_m) 和顺逆方向。圆弧半径 $R^2 = (x_a - x_m)^2 + (y_a - y_m)^2$ (4-5)

假设在 Δt 时间内走过一段圆弧, 弧长 $\Delta b = V_{\text{prog}} \cdot \Delta t$, 即 $\Delta b = R \cdot \Delta\varphi$, 则

$\Delta\varphi = \frac{V_{\text{prog}}}{R} \cdot \Delta t$, Δt 是插补周期。如图 4-5 所示。

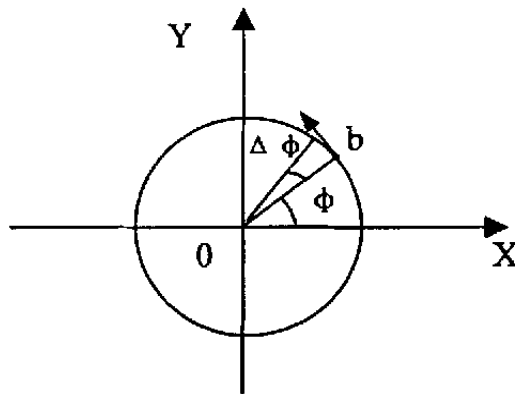


图 4-5 圆弧插补原理图

由圆的参数方程

$$\begin{cases} x = R \cos \varphi \\ y = R \sin \varphi \end{cases} \quad (4-6)$$

可以得到圆弧中间点的计算式如下:

$$\begin{cases} x_k = R \cos(\varphi_k + \Delta\varphi) \\ y_k = R \sin(\varphi_k + \Delta\varphi) \end{cases} \quad (4-7)$$

由于计算中间点坐标需要计算正、余弦函数值,这就需要计算能力强的计算单元,因此为简化计算,采用递推算法。

一次递推公式如下:

$$\sin(\varphi + \Delta\varphi) = \sin \varphi \cos \Delta\varphi + \cos \varphi \sin \Delta\varphi \quad (4-8)$$

$$\cos(\varphi + \Delta\varphi) = \cos \varphi \cos \Delta\varphi - \sin \varphi \sin \Delta\varphi$$

假设已知圆弧上第 k 点坐标 (x_k, y_k)

$$x_k = R \cos \varphi_k, \quad y_k = R \sin \varphi_k \quad (4-9)$$

则第 $k+1$ 点坐标 (x_{k+1}, y_{k+1})

$$\begin{cases} x_{k+1} = R \cos(\varphi_k + \Delta\varphi) \\ y_{k+1} = R \sin(\varphi_k + \Delta\varphi) \end{cases} \quad (4-10)$$

将式 (4-8) 代入式 (4-10) 可以得到

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k \cos \Delta\varphi - y_k \sin \Delta\varphi \\ y_{k+1} = y_k \cos \Delta\varphi + x_k \sin \Delta\varphi \end{cases} \quad (4-11)$$

$\cos \Delta\varphi$ 和 $\sin \Delta\varphi$ 在插补前按级数展开计算,即一个程序段只计算一次 $\cos \Delta\varphi$ 、 $\sin \Delta\varphi$ 。

同理可以得到二级递推公式为:

$$\begin{cases} x_{k+2} = -2 \sin \Delta\varphi \cdot y_{k+1} + x_k \\ y_{k+2} = 2 \sin \Delta\varphi \cdot x_{k+1} + y_k \end{cases} \quad (4-12)$$

4.3.1.3 抛物线插补

由于其曲率的连续变化，抛物线作为插补函数适合于任意曲线的无拐点逼近。其参数方程描述如下：

$$\begin{cases} x = a_0 + a_1\tau + a_2\tau^2 \\ y = b_0 + b_1\tau + b_2\tau^2 \end{cases} \quad (4-13)$$

则各轴速度方程表示如下：

$$\begin{cases} V_x = \frac{dx}{dt} = \tau(a_1 + 2a_2\tau) \\ V_y = \frac{dy}{dt} = \tau(b_1 + 2b_2\tau) \end{cases} \quad (4-14)$$

其中，参数 τ 是时间 t 的函数。

由于轮廓速度矢量是沿着抛物线的切线矢量，而切削加工要求轮廓速度 V 恒定不变：

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{\Delta t_i} = \frac{\Delta s_0}{\Delta t_i} \quad (4-15)$$

为了保持 $V = \frac{\Delta s_0}{\Delta t_i} = \text{常数}$ ，采用迭代法的时候每计算一步都对 $\Delta \tau$ 进行修正。

选择插补周期 $\Delta t_i = \text{常数}$ ，则 Δx 、 Δy 的迭代计算使得 $\Delta s_0 = \text{常数}$ ，或者是在设定数值范围内。首先计算 $\Delta \tau$ ，

由公式 (4-14) 微分方程转换为差分方程：

$$\begin{cases} V_x = \frac{\Delta x}{\Delta t_i} = (a_1 + 2a_2\tau) \frac{\Delta \tau}{\Delta t_i} \\ V_y = \frac{\Delta y}{\Delta t_i} = (b_1 + 2b_2\tau) \frac{\Delta \tau}{\Delta t_i} \end{cases} \quad (4-16)$$

以及公式 (4-15) 可以得到 $\Delta \tau$ ：

$$\Delta \tau = \frac{V}{\sqrt{(a_1 + 2a_2\tau)^2 + (b_1 + 2b_2\tau)^2}} \cdot \Delta t_i \quad (4-17)$$

对于第 k 次迭代，

$$\Delta \tau = \frac{V}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + 4(a_1a_2 + b_1b_2)\tau_k + 4(a_2^2 + b_2^2)\tau_k^2}} \cdot \Delta t_i \quad (4-18)$$

则第 $k+1$ 次迭代 $\tau_{k+1} = \tau_k + \Delta \tau$ ， $\Delta \tau$ 随插补周期发生变化。

这样就能从参数方程中计算出 x_{k+1} 、 y_{k+1} 的迭代公式：

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k + (a_1 + 2a_2\tau_k) \cdot \Delta\tau + a_2\Delta\tau^2 \\ y_{k+1} = y_k + (b_1 + 2b_2\tau_k) \cdot \Delta\tau + b_2\Delta\tau^2 \end{cases} \quad (4-19)$$

由于差分值没有完全反映参数 τ 的改变引起 X 的数值改变, 因而存在偏差。因此用迭代法修正这个偏差, 通过 $\frac{V_{理论}}{V_{计算}}$ 来修正参数 $\Delta\tau$, 一般只需修正一次 $\Delta\tau$ 就能获得满意的结果, 从而保持轮廓速度不变。

4.3.2 直接函数计算流程图

由直线插补计算公式可知, 对于一段需要插补的直线段, 同一进给轴在每个插补周期内的进给量是相同的, 因此在计算时, 只要计算一次 $\Delta\tau$, 进而得出 $a\Delta\tau$ 、 $b\Delta\tau$ 、 $c\Delta\tau$ 即可, 这样就大大缩短了计算时间。雕刻机软件用微线段拟合加工图形, 输出的刀具路径数据是各微直线段的起点和终点相对编程原点的绝对脉冲数, 因此, 若令 a 、 b 、 c 分别为 x 、 y 、 z 轴方向上的增量, 即有 $a = x_c - x_a$, $b = y_c - y_a$, $c = z_c - z_a$, 这样得出的增量 $a\Delta\tau$ 、 $b\Delta\tau$ 、 $c\Delta\tau$ 即为每个插补周期内各个轴的增量脉冲数 Δx 、 Δy 、 Δz 。其算法流程图如下 4-6 所示:

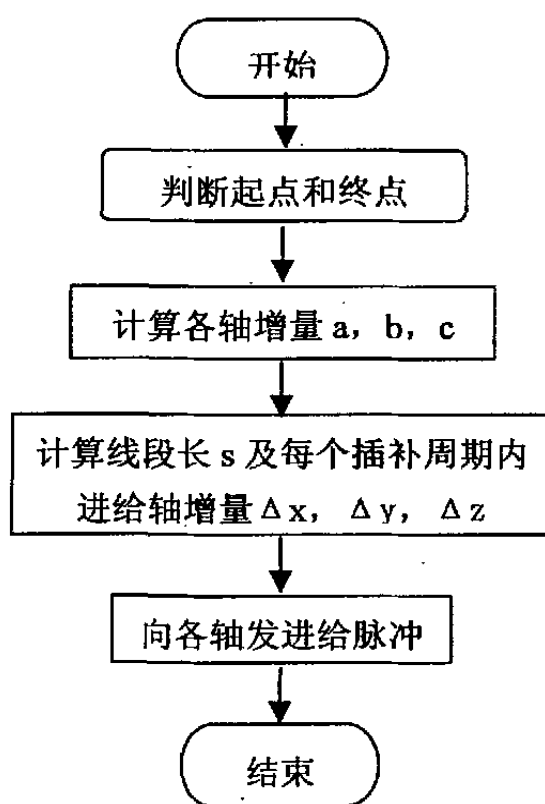


图 4-6 插补算法流程图

由公式 (4-2)、(4-3) 和公式 (4-4) 可以看出, 插补计算的结果是带有小数位的实数, 而电机驱动器接受的数据要求是整数, 因此在插补计算后要对计

算结果进行处理，分离其整数位和小数位，将整数位作为该插补周期要发送的脉冲数输入给驱动器，而将小数位累加保留至下一次插补结果中，从而保证直线段所含的脉冲增量发送完全，进而保证了终点的准确性。以 X 轴方向为例，其插补结果发送处理如下：

```

a          X 轴方向上的增量
i          插补计算结果整数位
i_0       插补计算结果小数部分
send_x    该插补周期内发送给 X 轴电机驱动器的脉冲数
remain_x  插补结果小数部分累加值
remain_x+=fabs(i_0);
if(a!=0)
{
    if(fabs(a-sum_x)>fabs(i))
    {
        if(remain_x>=1)
        { //注意增量的正负
            if(a>0) {send_x=i+1;remain_x--;sum_x=sum_x+send_x;}
            else
            if(a<0) {send_x=i-1;remain_x--;sum_x=sum_x+send_x;}
        }
        else {send_x=i;sum_x=sum_x+send_x;}
    }
    else if(fabs(a-sum_x)<=fabs(i))
    {send_x=a-sum_x;Prog_completed=1;}
}
else {send_x=0;}

```

第五章 雕刻机进给速度和加减速控制

数控雕刻机的主要功能式完成对复杂曲线、曲面的加工。复杂型面的高速、高精度加工不仅对雕刻行业，而且对航空、宇航、模具等制造业具有重要的意义。复杂的曲线、曲面的高速高精度加工一直是数控加工中的一个难题^[46]。本章详细讨论雕刻机控制软件开发中几个关键技术，其中包括进给速度控制、采用具有“前瞻”功能的加减速控制以及速度预处理技术来提高运动的平稳性。

5.1 进给速度控制

数控机床的进给速度通常指合成速度或轮廓速度，它对加工精度、表面粗糙度和生产效率有直接影响。根据零件材料、技术要求和轮廓形状尺寸来合理选择切削进给速度，一般要求进给速度稳定、有一定的调速范围，且起动迅速，停止准确。对采用步进电机驱动的数控系统，CNC 系统对进给速度控制是通过改变插补频率来实现的；而对于伺服电机驱动的系统，进给速度控制则是通过调整脉冲发送的频率。

5.1.1 进给速度控制方法

本课题所开发的数控雕刻机的进给系统是半闭环控制系统。伺服电机（伺服驱动装置）是进给伺服系统中一个重要的组成环节。进给伺服系统的给定速度指令经变换和功率放大后，作为伺服电机的输入量，控制它在某一个方向上作一定速度的角位移或直线位移（直线电机），从而驱动机床的执行部件实现给定的速度和方向上的位移。插补程序根据零件轮廓尺寸和编程速度向各个坐标轴分配脉冲序列，其中脉冲数提供了位置指令值，而脉冲的频率（一个插补周期内的脉冲数）确定了坐标轴的进给速度。

进给速度控制是通过软件与硬件接口实现的，通常可选的硬件接口有晶体管脉冲调宽系统（Pulse Width Modulation PWM）和普通单片机 I/O 口。与普通 I/O 方式相比，PWM 方式控制简单、灵活和动态响应好，调速范围宽，

本系统采用的 ARM 系列的 S3C44BOX 单片机有 6 个 16 位定时器，每个定时器都能按照中断模式或 DMA 模式工作。定时器 0, 1, 2, 3 都具有 PWM 功能（脉宽调制），因此我们利用定时器 0, 1, 2 控制伺服电机三轴方向上的脉冲发送。

每个定时器有一个倒计时器，实际上是一个通过定时器时钟源驱动的 16 位倒计时寄存器 TCNTn。当倒计时器数到 0，中断请求就产生了，这个中断通知 CPU 定时已经完成。定时器倒计时数到 0 的时候，寄存器 TCNTBn 的对应值就会

自动装载到倒计时器，从而继续下一次操作。

定时器使能后，定时计数缓冲区寄存器TCNTBn具有一个初值，装载到倒计时器计数器TCNTn中。定时器比较缓冲区寄存器TCMPBn有一个初值，装载到比较寄存器TCMPn与倒计时值比较。

PWM脉冲频率由TCNTBn控制，而脉冲宽度则由TCMPBn控制。TCNTBn和TCMPBn这两个缓冲区的应用使定时器在频率和占空比发生变化时，也能产生稳定的输出。而对比寄存器的值决定了PWM输出的开通与关闭时间。

5.1.2 进给速度预处理

对于连续切削的数控机床来说，进给速度调整有着很重要的意义。进给速度的大小不仅决定了加工效率，而且对表面质量有着重要的意义，同时，进给速度的剧烈变化还将严重影响刀具寿命。因此，应尽可能保持高速且稳定的恒表面进给速度（即刀具切削部位相对加工表面的进给速度）。但另一方面，由于曲面形状复杂，恒表面的进给速度必将导致机床各坐标轴运动速度的不断变化，若由此引起的坐标轴运动速度过高或速度变化过大时，将产生较大的几何轨迹误差。此外，由于机械运动部件的惯性，在机床的启动、停止和速度变化时产生运动冲击而影响加工精度、机床和刀具的寿命。因此，进给速度又必须根据曲面形状和机床动力特性对指令速度给予必要的调整，并在速度需要变化时采取合适的速度曲线实现平滑过渡^{[4][47]}。所以对进给速度处理一般分为进给速度预处理（前瞻）和进给速度控制两部分，前者要求数控系统具有预处理功能，后者要求数控系统具有自动加减速功能。

然而，目前基于离线编程的曲面加工在进给速度控制方面还存在一些不足：编程方面，进给速度一般按刀具在偏置曲面上匀速进给来确定，很少考虑根据曲面形状和实际机床力学特性来确定合适的进给速度曲线；在CNC控制方面，由于曲面加工被离散成一系列小直线段或圆弧段指令执行，CNC系统只是忠实地执行各程序段的指令进给速度，微线段引起的频繁加减速使进给速度难以保持稳定，平均速度也难以达到指令速度。

数控系统在完成数控程序的编译处理后，对数控数据进行预处理，预先根据编程进给速度和加、减速控制算法计算出程序段的进给速度和加、减速度，进而计算出运动的几何轨迹，然后送到多段缓冲器。这就是“先行控制”（Advanced preview control），有时也称为“前瞻”（“look ahead”）控制的原理。

速度预处理的必要性：一方面微线段引起的频繁加减速使得进给速度很难保持均匀，从而引起的运动冲击极大地影响了加工精度的提高；另一方面数控

加工中，如果某一加工区域刀具路径方向有较大的改变，则当以指令速度进给时，在这些区域会发生过切或残留。

Look ahead 功能就是数控系统在控制加工的同时超前扫描待加工的数控代码，如果发现刀具路径方向上突然改变，则以某种方式平稳地将进给速度降下来，以免因机床的惯性而出现过切或残留，同时也保证了进给速度的均匀性。如果进给速度没有突变，进给速度不必要减速。如图 5-1 所示。虚线是未作速度预处理的实际进给速度，实线是经速度预处理后的实际进给速度。

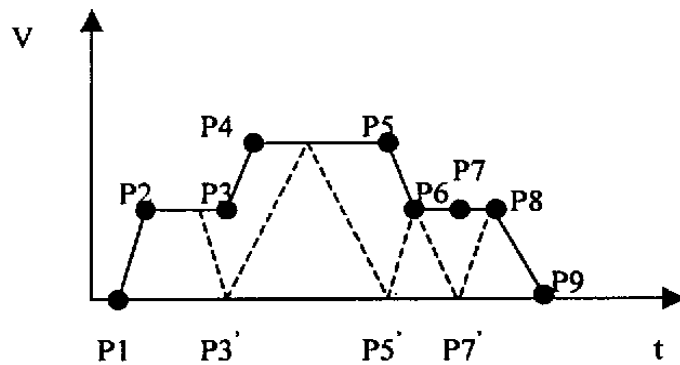


图 5-1 速度预处理图

5.2 加减速控制

数控加工正朝着高速高效方向发展。在高速数控加工中，一方面由于进给速度高，为充分利用机床的有效工作行程（一般只有数百毫米），必须要求各坐标运动部件能在极短的时间内达到给定的速度并能在高速行程中瞬间停准。另一方面，由于高速加工的切削时间缩短，换刀间隔缩短，机床运动启停频繁，因此，缩短运动部件启停的过渡过程时间，也具有重要意义。上述两方面要求归结到一点，就是要求机床运动具有极短的加减速过渡过程。然而，如果仅从时间上去考虑缩短过渡过程，而不对机床的加减速动态过程进行合理的控制，必将给机床结构带来很大冲击，轻者将使其难以正常工作，重者将损伤机床零部件。

因此，如何保证在机床运动平稳的前提下，实现以过渡过程时间最短为目标的最优加减速控制规律，使机床具有满足高速加工要求的优良加减速特性，已成为现代数控系统研究开发中亟待解决的关键问题之一。

5.2.1 加减速自动控制原理

目前数控系统中常用的加减速规律包括很多：数控系统中常见的加减速控制算法有直线形、三角函数形、指数形、S 曲线形、直线加抛物线形加减速等控制曲线算法^[3-4]。

据加减速控制在数控系统中的位置，加减速通常分为两种：前加减速和后加减速。前加减速中加减速控制位于插补器的前面，后加减速中加减速位于插补器的后面。其位置如图 5-2。

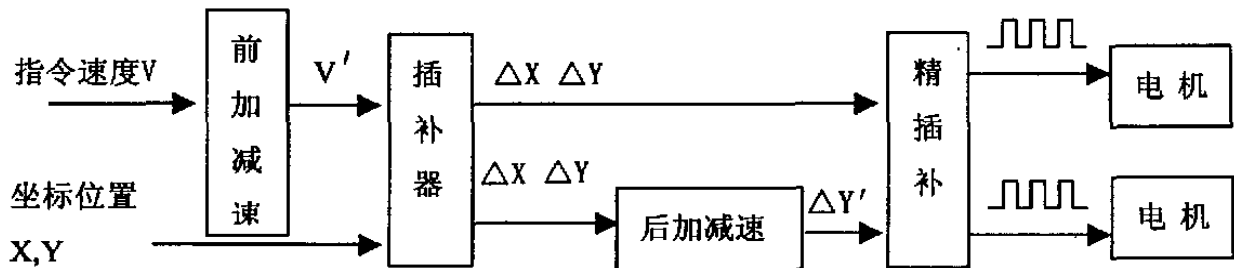


图 5-2 前加减速和后加减速

前加减速的控制对象是指令进给速度 V ，它在插补前计算出进给速度 V' ，然后根据进给速度 V' 进行插补，得到各坐标的进给量 ΔX 、 ΔY ，然后转换成进给脉冲或电压驱动电机，这种方法能够得到准确的加工轮廓曲线，但需要预测减速点。

而后加减速在插补过后进行加减速处理，它的控制量是各动轴的速度分量。它不需要预测减速点，而是在插补输出为零时开始减速，并通过一定的时间延迟逐渐靠近程序段的终点。这种方法的缺点是：由于它是对各运动轴分别进行控制，所以在加减速控制后，实际各坐标轴的合成位移不准确，引起轮廓误差。并且当轮廓中存在急剧变化时，后加减速无法预见，从而会产生过冲，因此很难保证各坐标轴的联动关系，必然造成轨迹误差，最终形成加工形状误差。

本文即采用前加减速规律。前加减速处理的方法有多种，如直线、指数、S 型等加减速规律。

直线加减速算法优点是计算简单，机床相应快，效率高。虽然在加减速阶段起点 A、C 等处可能对机床产生一定冲击，但是通过适当的加速度设置，将其应用于数控雕刻机中，依然可以取得较好的速度平滑的效果。

直线加减速原理如下：

如图 5-3 所示，数控系统每插补一次，都要进行稳定速度、瞬时速度和加减速处理。当系统计算出的新稳定速度大于原来的稳定速度时，就需要进行加速处理。在这种情况下，瞬时速度为：

$$V_{i+1} = V_i + aT \quad (5-1)$$

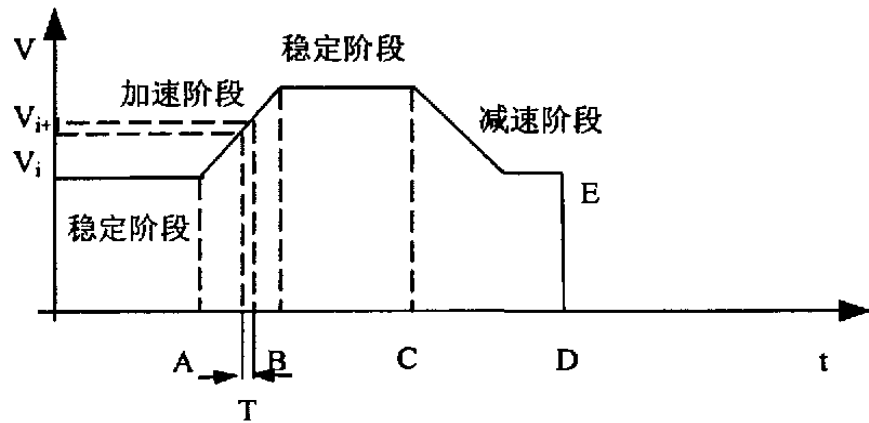


图 5-3 直线加减速规律

式中 a 为加速度， T 为插补周期。此时系统以新的瞬时速度 V_{i+1} 进行插补计算，得到该周期的进给量，对各坐标轴进行分配，这是一个迭代过程，这个过程一直进行到 V_i 为稳定速度为止。

同理，处于减速阶段时： $V_{i+1} = V_i - aT$ (5-2)

此时系统以新的瞬时速度进行插补计算，这个过程一直进行到新的稳定速度为零为止。

5.2.2 雕刻机数控系统加减速的自动控制

由公式 [5-1] 和公式 [5-2] 可以看出，速度是时间的函数。对于雕刻机数控系统来说，系统采用的是数字增量插补算法，在每个插补周期循环中发出的指令脉冲数大。又由于采用 32 位单片机控制伺服电机，处理器具有很高的处理速度，因此系统设计加、匀、减速函数，通过判断加减速状态标志实现控制。下面我对加工轨迹的段间和段内的速度平滑、加减速自动控制三个方面进行讨论。

一、多程序段间速度平滑控制

多程序段运动速度的平滑处理能有效减少加工时对机床产生的冲击，提高数控加工的速度和加工精度。从速度角度考虑，希望由单段的零速—加速—匀速—减速—零速平滑成多段的零速—加速—匀速—减速—零速。由于相邻两程序段的运动矢量间的夹角较大时，容易造成运动轴速度变化较大，这样会给机床产生较大的冲击，影响加工精度。本文提出的控制算法就是基于两相邻运动矢量的夹角和加工速度变化不超出极限值的原理，计算出拐点处的速度，并给出减速点的提前判断，实现进给速度的自动控制。下面以直线段间的速度平滑问题为例进行讨论。

1、加工轨迹中拐点的判断

如图 5-4 所示， $P_1 P_2$ 、 $P_2 P_3$ 、 $P_3 P_4$ 与 X 轴正向夹角分别为 α 、 β 、 γ ，相邻两直线间的夹角分别为 χ 、 δ ，编程速度为 F 。假设 $P_1 P_2$ 、 $P_2 P_3$ 、 $P_3 P_4$ 段的各轴速度分别为： V_{XP1P2} 、 V_{YP1P2} 、 V_{XP2P3} 、 V_{YP2P3} 、 V_{XP3P4} 、 V_{YP3P4} 。各轴允许

的最大速度变化量为 V_x 、 V_y 。

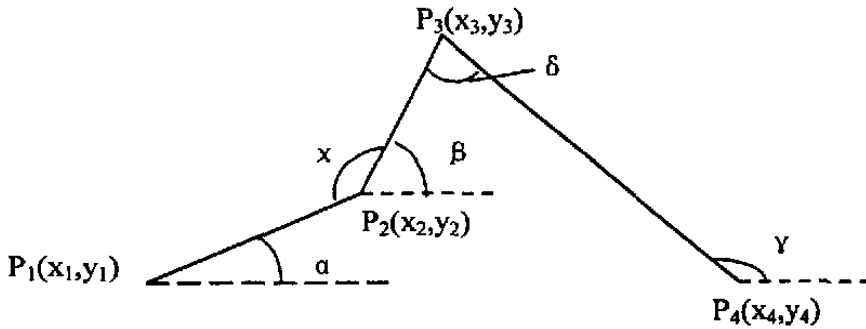


图 5-4 拐点判断原理图

1) 首先计算两直线的夹角 x ，如果 $x \leq 90^\circ$ ，则表示必然有一轴将发生转向而且拐弯很急，此时 P_2 点是拐点，拐点速度降为 0。

2) 如果 $x > 90^\circ$ ，则要继续判断：

$$\alpha = \arctan \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad \beta = \arctan \frac{y_3 - y_2}{x_3 - x_2} \quad \gamma = \arctan \frac{y_4 - y_3}{x_4 - x_3}$$

$$\begin{aligned} V_{XP1P2} &= F \times \cos \alpha & V_{YP1P2} &= F \times \sin \alpha \\ V_{XP2P3} &= F \times \cos \beta & V_{YP2P3} &= F \times \sin \beta \\ V_{XP3P4} &= F \times \cos \gamma & V_{YP3P4} &= F \times \sin \gamma \end{aligned} \quad (5-3)$$

令 V_{x1} 、 V_{y1} 、 V_{x2} 、 V_{y2} 表示各轴速度的改变量，则： $V_{x1} = V_{XP2P3} - V_{XP1P2}$ ， $V_{y1} = V_{YP2P3} - V_{YP1P2}$ ， $V_{x2} = V_{XP3P4} - V_{XP2P3}$ ， $V_{y2} = V_{YP3P4} - V_{YP2P3}$ ，加减速的判断原则是：如果 $|V_{x1}| > V_x$ 或 $|V_{y1}| > V_y$ ，就表示 P_2 是拐点

这样我们就可以将一个零件连续的加工轨迹，以拐点为界，分成若干个进给速度平稳的分段区间，在这些区间内按照直线加减速算法控制速度的加减。

2、拐点速度的计算

由于线段间是具有连续性的，加工过程中，线段间的过渡中加工速度也应该是连续变化的，在插补过程中应该充分考虑这些信息。拐点速度受以下几个因素的影响：单轴所能达到的最高速度、电机加速能力、相邻程序段的几何关系、插补周期与精度要求、提前减速点限制。

拐点的临界加工速度可以根据公式 (5-3) 反推出来：

1) 如果 $|V_{x1}| > V_x$ ，则临界速度计算如下：

$$F_{lim} = \frac{F \cos \alpha \pm V_x}{\cos \beta} \quad (5-4)$$

2) 如果 $|V_{y1}| > V_y$ ，则临界速度为：

$$F_{lim} = \frac{F \sin \alpha \pm V_y}{\sin \beta} \quad (5-5)$$

这里需要根据 V_{x1} 的正负来确定公式 (5-4)、(5-5) 中是“+”还是“-”。同时需要注意的是，终点无需判断，可视为拐点并且速度为零。

二、段内速度控制

当段内总位移量足够长时，则该程序段的运行过程便有加速、匀速、减速过程。而当总位移量不够长时，有可能只经过两个或一个过程，因此在拐点判断之后，需对两拐点之间的大程序段进行加减速标记判断。

首先根据加速度、指令进给速度和加减速规律计算该段的加速区长度和减速区长度，然后与总位移量进行对比，从而得出该大程序段的加减速状态。根据实际加工情况，可以将程序段分为以下五种类型：

```
#define Up_And_Down 5 //加速-匀速-减速状态
#define Up_Reg 6 //加速-匀速状态
#define Only_Up 7 //只加速状态
#define Reg_Down 8 //匀速-减速状态
#define Only_Down 9 //只减速状态
```

通过将程序段分类，判断加工段的加减速状态，同时设置加速、匀速、减速标记，插补时根据所处的状态调用相应的模块，从而实现段内速度平滑。

为便于讨论，对以下变量进行说明：

```
#define Up_states 0 //加速状态
#define Up_completed 1 //加速完成
#define Down_states 2 //减速状态
#define Down_completed 3 //减速完成
#define reg 4 //匀速状态
Updown_flag: //加减速标记
Up_Down_States: //加减速状态
v_D: //编程速度
v_max1,v_max2: //第 N、N+1 拐点的临界速度
length_up,length_down: //相对编程速度的加减速距离
length_u0,length_d0: //相对临界速度的加减速距离
length_all: //第 N、N+1 拐点之间轨迹长度
```

加减速标记判断流程图如图 5-5 所示。

加减速处理的基本思想是：以拐点为界，加工轨迹被分成进给速度相对平稳的分段区间，这些区间内做加减速控制。

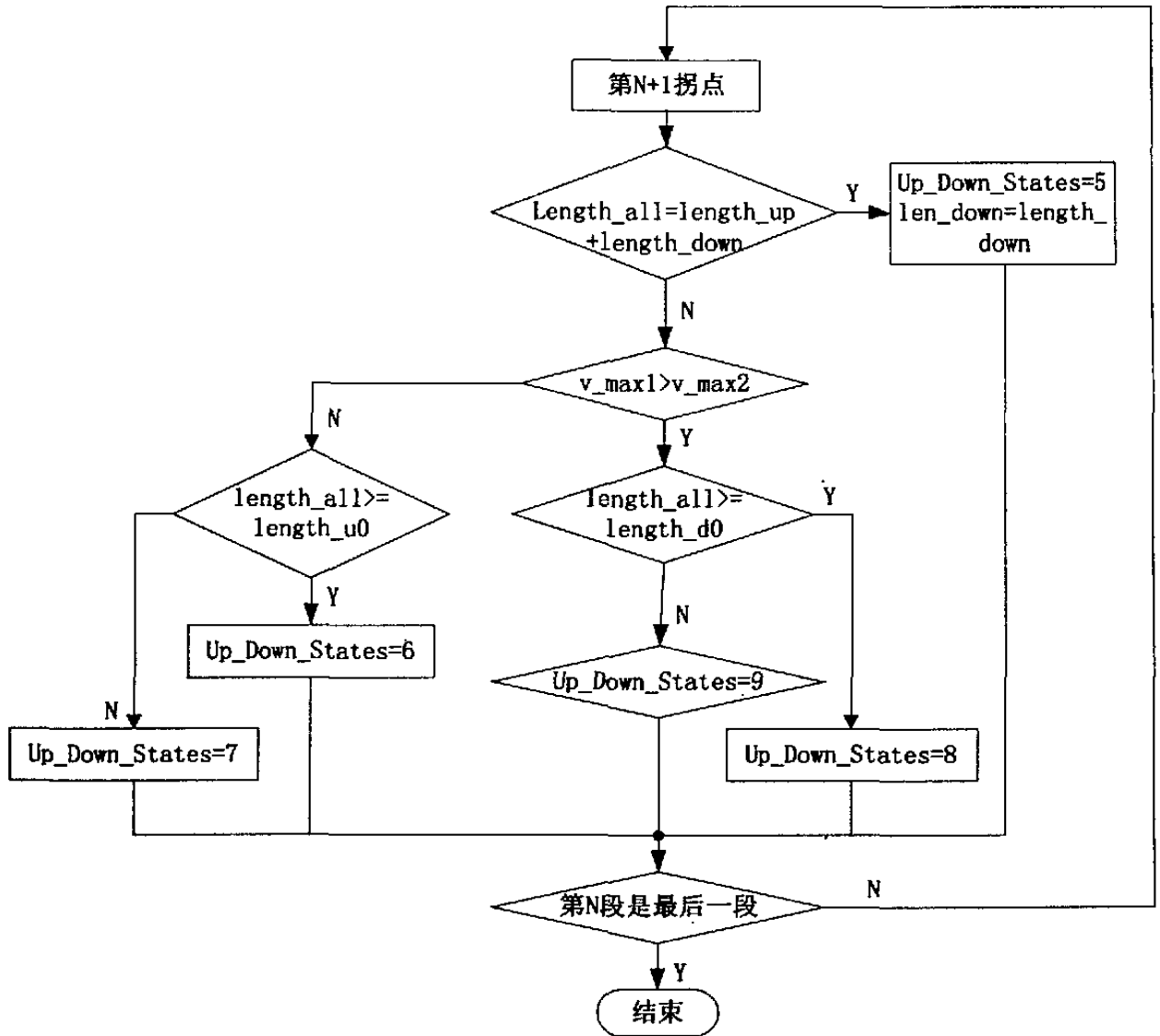


图 5-5 加减速标记判断流程图

图 5-6 是具有速度预处理和加减速功能的数控系统与不具备此功能的数控系统的进给速度函数对比示意图。

图中，a)表示的是未经过速度预处理时，数控系统实际输出的进给速度。因为在加工过程中，系统不知道下段轨迹的变化规律，所以每一段只能从零开始加速，最后速度减为零，从图中可以看出，每一段连接处速度波动非常大，特别是加工小直线段时，为保证加工的平稳性，进给速度非常低；图 5-6 b)，经过拐点判断后，系统把相邻两拐点之间的小直线段串起来，在每一大段内采用加减速，明显提高了加工过程中的平均速度和平稳性，但在拐点处速度波动还是很大；而图 5-6 c)中，把经过拐点判断并按图 5-5 进行加减速处理后，在拐点处速度波动的到了进一步改善，平均速度也得到明显提高。

三、加减速自动控制

系统加减速自动控制的实现方法是：系统执行插补计算时，首先根据加减速标记 (Updown_flag) 来确定加速还是减速，再根据开始加速速度、目标加速速度或目标降速速度来确定加减速的目标值。一旦加速达到目标值

Up_Down_States=Up_completed，这样系统就知道加速完成；同样，Up_Down_States=Down_completed 表明减速完成。

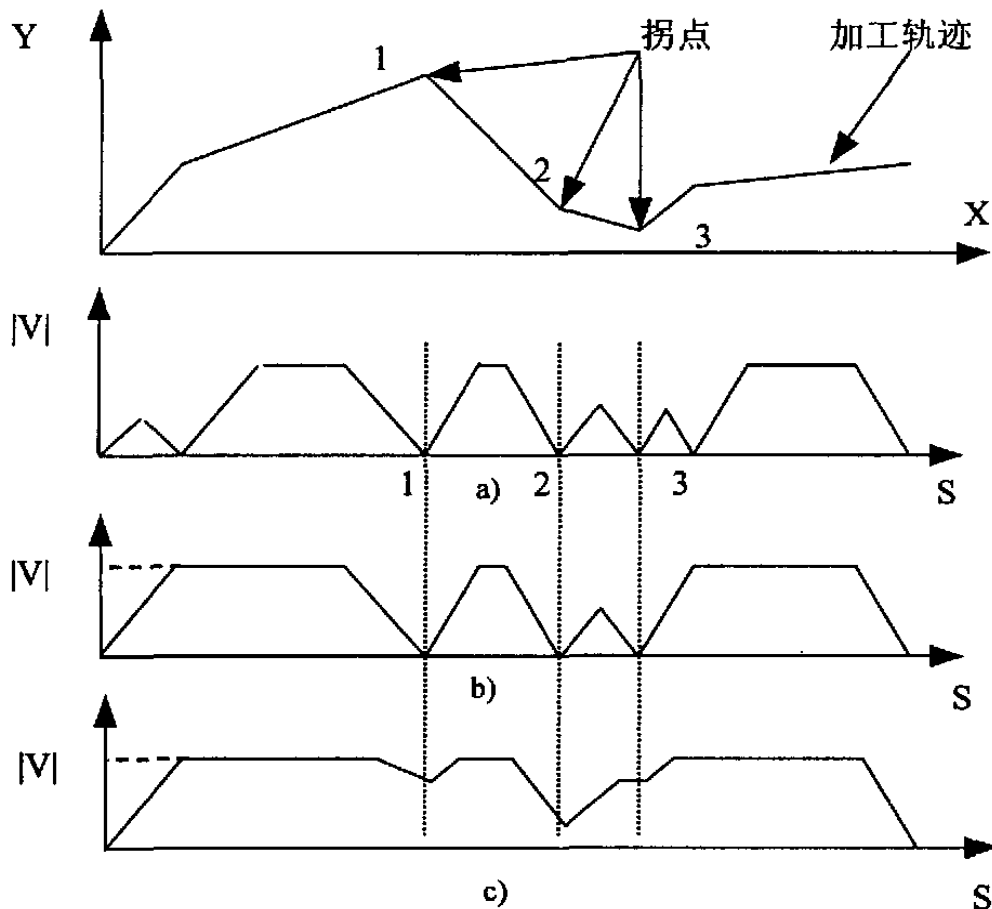


图 5-6 速度预处理效果图

该系统通过调用相应的函数来实现加减速控制，其中需要注意的一个重要的问题是减速点的判断，因为减速点的正确判断，对控制系统的性能影响很大，这是由于过早开始减速，为了达到终点，减速时间需要加长；若减速太迟，由于没有足够的减速距离，可能造成冲击和位置偏差。本文采用减速点预测方法。

对于单个直线程序段来说，在插补过程中需要预测减速点，以确定何时进入减速区，以采用减速算法进行插补，从而保证在系统运行到终点时，速度达到预定值。对于长的程序段来说，减速点一般处于程序段内，只要在插补过程中比较程序段的插补剩余长度与减速区长度，即可确定何时进入减速区；而对于短的程序段，减速点可能在前面一个或几个程序段内，需要提前几段判断减速点。根据前面拐点的判断，我们得到相对速度平稳的加工段，可以将这些加工段视为比较长的程序段，段内判断减速区。

具体算法是：在计算出减速区长度的基础上，根据插补算法预先计算出等于或稍大于减速区长度范围的插补点，然后通过判断当前插补点后面的长度是否进入减速区范围来判断当前点是否已进入减速区。在该区间内若存在需要提前减速的程序段，则在减速点处设立减速标志，插补到该点处开始减速。这样就需要在系统内存中开出一块很大的数据缓冲区(buffer)，用以进行超前处理，

存放预插补点。

四、关于低速段的引入

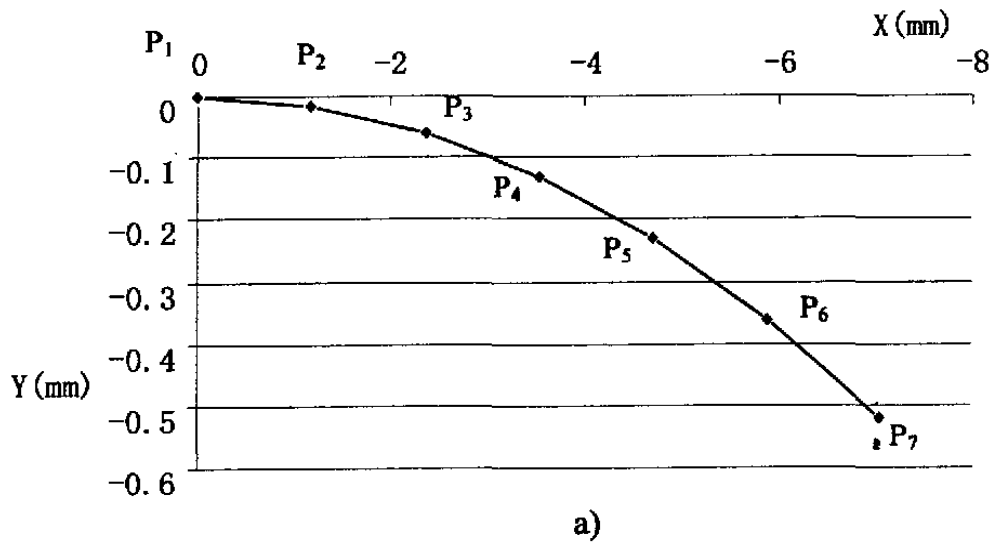
在实际的降速过程中，实际的降速要比理论的情况提前一段距离 ΔS （作为参数设定），然后以某个较低的速度 f_{low} （ f_{low} 作为参数预先设定）运行一段时间再降为零，如图 5-3 中的 ED 段。

引入低速段的目的是：（1）考虑机械系统的惯性。由于这个惯性，使实际的运行速度总滞后于指令速度，增加低速段，可减少这种滞后量，从而使定位可靠。（2）由于在加减速处理、插补计算处理中存在着误差，不增加低速段，可能使计算终点与给定终点不重合，从而产生位置误差，而增加低速段，可使这种误差得到补偿。

低速段的控制是：在低速段开始时设置终点判断标志，插补运算程序根据标志进行归终处理，以保证机床能准确到达终点。

图 5-7a) 是一段实际加工轮廓（设 P_1 为坐标原点），由直线段 P_1P_2 、 P_2P_3 、 P_3P_4 、 P_4P_5 、 P_5P_6 、 P_6P_7 组成， $P_1(50,98,1)$ ， $P_2(48.82,97.985,1)$ ， $P_3(47.64,97.94,1)$ ， $P_4(46.465,97.87,1)$ ， $P_5(45.29,97.77,1)$ ， $P_6(44.12,97.64,1)$ ， $P_7(42.955,97.48,1)$ 。

对这段轮廓进行讨论，图 5-7 b) 是未进行速度预处理的速度曲线图，每个直线段都要经过加速—匀速—减速的过程，加工速度波动比较大，平均速度较低；图 c) 是进行预处理后得到的速度曲线图，由“拐点”判断准则得到 P_3 、 P_5 点是拐点，计算拐点的临界速度，从图上可以明显看出速度波动减小，并且加工时间也缩短了。



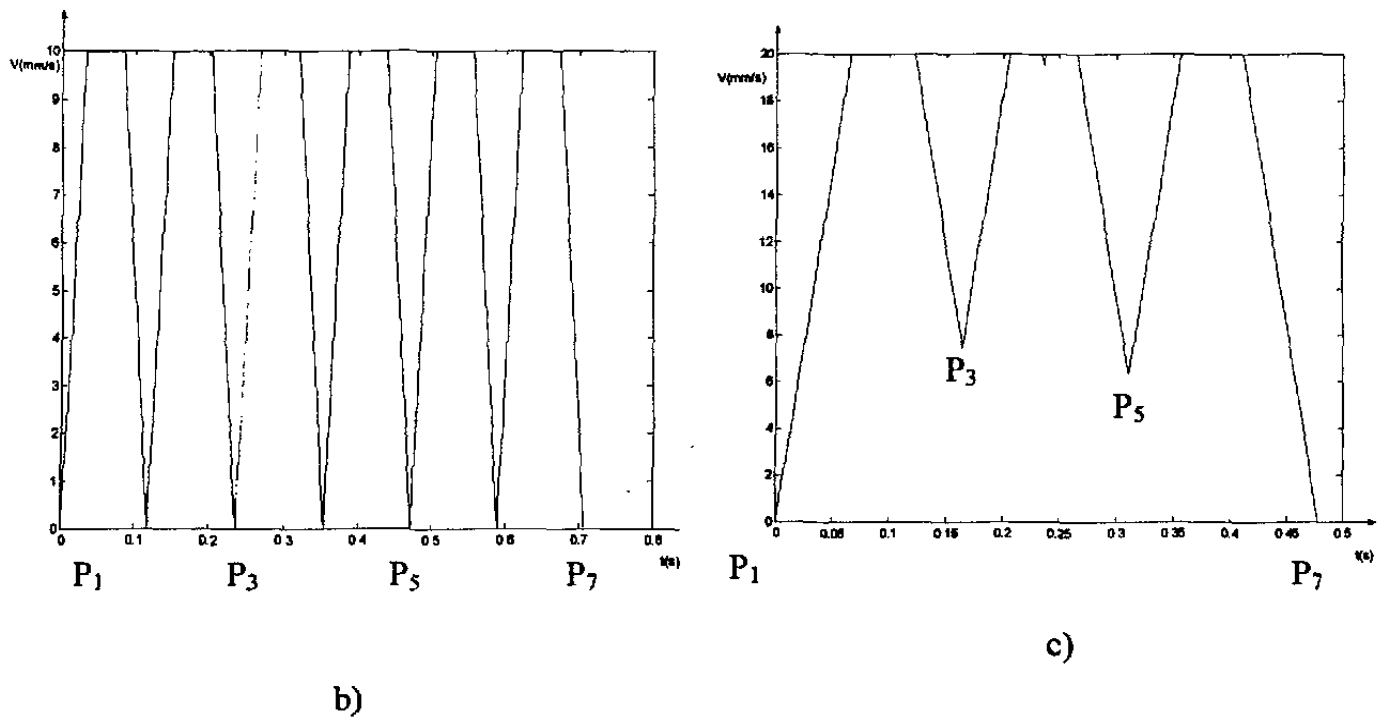


图 5-7 速度预处理效果图 2

a) 加工轮廓 b)未作预处理的速度曲线图 c)经过预处理的速度曲线图

第六章 总结与展望

6.1 总结

数控雕刻技术广泛应用于模具模型、工艺品、印刷电路板的制作和广告、建筑装饰等行业，但目前国产数控雕刻机的加工效率和加工质量比较低。本文主要讨论了以 32 位单片机为控制核心，完成了对 CAM 生成的加工代码进行编译、解释，实现插补算法，最后完成雕刻机刀具运动轨迹和速度控制等任务。主要研究工作总结如下。

(1) 研究了计算机数控雕刻系统的功能、结构和组成，其中包括：雕刻机系统的控制原理、雕刻机数控系统的特点、组成及主要功能；

(2) 研究 CAM 与 CNC 之间数据传输的方式，提出用 USB 接口实现 CAM 与雕刻机间的数据传输；

(3) 详细分析了嵌入式系统的特点，采用 ARM 微处理器系列的单片机 S3C44BOX 作为高速高精度数控雕刻机的硬件平台，并对基于 ARM 处理器的嵌入式系统软件的开发技术进行了研究，设计了数控雕刻系统的软件结构；

(4) 对控制系统核心软件插补计算进行了深入研究，采用直接函数计算法进行插补，与交流伺服电机配合，可明显提高进给速度；

(5) 提出一种运动“拐点”的判断准则，研究速度前瞻预处理技术，应用具有“前瞻”功能的自动加减速控制技术，提高了进给速度的均匀性和加工精度。

6.2 展望

6.2.1 雕刻数控系统前景展望

计算机数控雕刻系统作为制造业一个有力工具，有着非常广阔的发展前景，随着计算机技术、电机技术、机械技术等各个科学技术的发展，计算机数控雕刻系统的功能将日益强大，性能将更趋稳定。计算机雕刻系统发展趋势总结如下：

(1) 更加精密

控制部分和机械部分精度的提高将极大地提高雕刻系统的精度，控制部分将向闭环伺服方向发展，通过反馈调整做到误差补偿，从而可以大幅度提高精度，机械部分将采用更高精度的滚珠丝杠和驱动电机，同时装配工艺的提高也

将进一步提高系统的精度^[47-48]。

(2) 更加高效

高性能运动控制技术如 DSP 技术、32 位单片机等的发展，驱动电机性能的提高，刀具性能的提高，采用规范的软件开发技术等等，都将会推动数控雕刻系统向着高速、高效、高可靠性的方向发展。

(3) 利用移动通讯技术和网络技术飞速的发展，数控雕刻机将朝着数字化、网络化的方向发展。

(4) 随着嵌入式系统的广泛应用，基于嵌入式系统的数控雕刻机也将迅速发展起来。

6.2.2 基于嵌入式系统的雕刻机控制软件的展望

嵌入式系统已广泛应用于工业控制、交通管理、信息家电、环境监测等各个领域，并且具有非常广阔的应用前景。随着嵌入式技术的不断发展，基于嵌入式系统的雕刻机控制技也将取得更大的进步。在硬件方面，DSP 运动控制卡等高性能运动控制器以及其他嵌入式微处理器将逐渐应用于雕刻系统中，从而使得雕刻系统形式更多样化；随着 Linux 等免费型实时操作系统和 VxWorks 等商用型嵌入式操作系统的广泛应用，雕刻系统的操作平台也将跨出 WINDOWS，带动基于嵌入式系统的雕刻系统不断提升与飞跃。

参考文献

- [1]游有鹏, 开放式数控系统关键技术研究, 南京航空航天大学博士学位论文, 2001, 12
- [2]梁福军. 石治平. 21 世纪的制造技术. 机械工程学报[J], 2002, 38 (1): 1-8
- [3]廖效果, 刘又午, 数控技术, 湖北科学技术出版社, 2000
- [4]吴祖育, 秦鹏飞, 数控技术 (第三版), 上海科学技术出版社, 2000
- [5]林奕鸿, 机床数控技术及其应用, 机械工业出版社, 1994
- [6]申丽国等, 国外数控技术的研究动向和发展趋势, 机械工业自动化, 1996 (2)
- [7]文广, 马宏伟, 数控技术的现状及发展趋势, 机械工程师, 2003 (1): 11
- [8]赖国庭, 吴玉厚, 富大伟, 开放式数控系统的发展及性能研究, 机械与电子, 2003
- [9]戴君, 时宁, 开放式数控的体系结构探讨, 机械工程师, 2000 (7)
- [10]陆启建, 刘明灯, 数控技术的新发展, 制造技术与机床, 2002 (5): 5-7
- [11]杜世昌, 高速加工数控编程技术的研究, 合肥工业大学硕士学位论文, 2003
- [12]http://www.step-nc.org/frames/newsletter_frames.htm/
- [13]<http://www.step-nc.org/html/benefits.htm/>
- [14] Stephen Chan, Helium Mak, Nathalie Cloutier. Product Data Sharing with STEP. Concurrent Engineering: Method and Application[M], Elsevier Science Publishers B. V. 1993, 277~298
- [15]傅建中等, 超高速变频数控雕刻技术研究
- [16]编委会, 《机电一体化技术手册》上册, 机械工业出版社, 1986
- [17]张昱, 三维雕刻机的研制, 合肥工业大学硕士学位论文, 2002.9
- [18]王青松、傅建中, 面向对象的计算机数控雕刻控制软件, 机电一体化, 2000 (6): 40-41
- [19]王青松, 面向对象的计算机数控雕刻控制软件的研制, 浙江大学硕士学位论文, 2001.2
- [20]袁绍渊, 机床工业发展的成就和趋势, 世界产品与技术, 1998 (4)
- [21]马伟编著, 计算机 USB 系统原理及其主/从机设计, 北京航空航天大学出版社, 2004
- [22]凌志浩, 张文超, 俞金寿, 嵌入式系统结构及其发展概况, 自动化仪表, 2003 (4)
- [23]马忠梅, ARM 嵌入式处理器与嵌入式系统, 电子世界, 2003 (3): 41
- [24]李林功, 李华玲, 嵌入式系统的构成与特点, 电测与仪表, 2003 (5)
- [25]孙天泽, 基于 ARM 处理器的嵌入式开发平台研究与设计, 吉林大学硕士学

- 位论文, 2003
- [26]张晶, 曾宪云, 嵌入式系统概述, 电测与仪表, 2002 (4)
- [27]王田苗, 嵌入式系统设计与实例开发——基于 ARM 微处理器与 $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 实时操作系统, 清华大学出版社, 2002
- [28]ARM 中国, 费泽平, 基于 ARM 的嵌入式系统程序开发要点, 单片机与嵌入式系统应用, 2003 (8)
- [29]周荷琴, 刘兵, 孙景群, 嵌入式系统软件设计要点, 计算机应用, 1998 (3)
- [30] $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ ——源码公开的实时嵌入式操作系统, JEAN J.LABROSSE 著, 邵贝贝译, 中国电力出版社, 2003
- [31]毕承恩, 丁乃建, 现代数控机床 (上、下), 机械工业出版社, 1993
- [32]李诚人, 机床计算机数控, 西北工业大学出版社, 1988
- [33]刘文信, 孙学礼, 机床数控技术, 机械工业出版社, 1995
- [34]卓迪仕, 数控技术及应用, 国防工业出版社, 1997
- [35]王青松, 曾伟梁, 傅建中, 计算机数控雕刻技术现状与发展
- [36]Next Generation AI CNC: FANUC 15 Series.FANUC Ltd
- [37]Satdelmann R, Computation of nominal path value to generate various special curves for machine tools, Annals of the CIRP, 1989, 38(1)
- [38]Bedi S and Quan N, Spline interpolation technique for NC machines, Computer in Industry, 1992, 18: 307-313
- [39]Shpitalni M, Koren Y and Lo C C, Realtime curve interpolators, Computer-Aided Design, 1994, 26(11): 832-838
- [40]吴光琳, 组合曲面实时插补关键技术研究, 上海交通大学博士学位论文, 2000
- [41] Bedi S, Ali I and Quan N, Advanced interpolation techniques for NC machines, Transaction of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 1993, 115(8): 329-336
- [42]沈福金, 谭汝谋, 从 CIMT'99 看我国机床工业的进步与差距, 制造技术与机床, 1999, (2): 5-6
- [43]王水来, 曲面实时插补算法及应用研究, 华中理工大学博士学位论文, 1996
- [44]周济, 周艳红, 周云飞, 自由曲面的 CNC 直接插补加工技术, 高技术通讯, 1998 (11): 30-35
- [45]刘亚东, 开放式数控系统关键技术的研究及应用, 上海交通大学博士学位论文, 2002
- [46] $\mu\text{C}/\text{OS}-\text{II}$ 在 ARM 上的移植, 李明, 电子设计与应用, 2003, 4
- [47]游有鹏, 王珉, 样条曲线插补脉冲增量插补控制, 制造技术与机床, 2000 (3)
- [48]彭芳瑜, 彭成, 周云飞等, 七轴五联动车铣机床的恒表面进给速度控制, 机

械与电子, 2005 (5): 23-25

[49]黄河, 王时龙, 张宝倩, 大型复杂程序在开放技术的研究, 机电一体化, 2003 (1)

攻读硕士学位期间发表的学术论文

- [1]桂贵生，彭丹丹，许良元，直接函数算法在数控雕刻机中的应用，组合机床与自动化加工技术（已录用）
- [2]许良元，桂贵生，彭丹丹，高速加工中加减速控制的研究，中国制造业信息化，2005（2）