

厦门大学

---

硕士学位论文

---

纯软件开放式数控系统的研究及其在加工中心上的应用

---

姓名：李寅

---

申请学位级别：硕士

---

专业：机械电子工程

---

指导教师：陈永明

---

20090601

## 摘要

随着数控技术的不断发展，传统数控系统已不能适应当今制造业市场的变化与竞争，也不能满足现代制造业向信息化、敏捷模式发展的需要。因此，随着 PC 技术的快速发展和广泛普及，开放式数控系统技术开始发展。开放式数控系统不依赖特定的硬件平台和操作系统平台，采用模块化和标准化的结构体系，允许用户进行二次开发。

开放式数控系统有三种实现方式：PC 嵌入 NC 型、NC 嵌入 PC 型和纯软件式。其中，纯软件开放式数控系统充分利用 PC 微机丰富的硬件资源，系统的全部核心功能--包括插补运算、加减速运算、PLC 等实时任务，均由运行在 PC 硬件平台上的软件实现，是开放程度最高的一种实现方式。

**ServoWorks** 是基于 PC-based 解决方案的软件 CNC 技术，它对硬件体现了很高的兼容性，可以运行在目前通用的 PC 微机操作系统平台之上，通过 RTX 软件扩展了 Windows 系统的实时性，使之符合数控系统的实时性要求。

本论文基于纯软件式 **ServoWorks CNC** 技术的全面理论研究，在三轴立式加工中心上实现了开放式数控系统 S100M 和配套的整机 PLC 程序。随后，介绍了工程规范的制定以及电气、基本参数和伺服调试的过程。

本课题接下来的工作围绕五轴联动机床和人机界面及功能扩展两方面展开，此外，智能化、网络化也将是未来的发展方向。

**关键词：**纯软件开放式数控系统；**ServoWorks**；加工中心。

## Abstract

With the unceasing development of numeric control technology, traditional CNC systems already neither suitable for the change and competition in the manufacturing markets nowadays, nor satisfied with the requirement of modern manufacturing industry growing to informationization and agile mode. Therefore, open CNC system starts to develop along with the PC technology that has extensive popularization and rapid growth. Open CNC system is independent of specific hardware and operating system platform; it adopts the architecture of modularization and standardization and allows the user to make the secondary development.

There are three ways to the Open CNC system: NC-based PC-embedded, PC-based NC-embedded and Pure-Soft Open CNC. Among them, Pure-Soft open CNC, which take full advantage of the abundant hardware source of PC, and make the whole kernel system function(including the real time task of interpolation, acceleration and deceleration calculation and PLC) come true by the software running on the PC hardware platform, is a realization method with the highest degree of openness.

ServoWorks is a soft CNC technology based on PC-based solution. It has good compatibility to the hardware. It can run on the conventional PC operation system platform and extend the real time capability of Windows system using RTX software to satisfy the requirement of CNC system.

This paper which based on the comprehensive theoretical research on the ServoWorks CNC technology, brought into effect the open CNC system S100M and the assorted PLC programs. Soon after, the paper introduces the planning of engineering standard and the debugging process of electricity, essential parameters and the servo amplifiers.

The following tasks will carry on from two aspects: five-axle linkage machine tool and the extension of HMI and functions. Moreover, intellectualization and networking are also the future evolving directions.

**Key Words:** Pure-Soft Open CNC System; ServoWorks; Machine Center.

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下, 独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果, 均在文中以适当方式明确标明, 并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范 (试行)》。

另外, 该学位论文为( )课题(组)的研究成果, 获得( )课题(组)经费或实验室的资助, 在( )实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称, 未有此项声明内容的, 可以不作特别声明。)

声明人(签名): 李康

2009年 6月 8日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（）1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（）2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：李康

2009年06月09日

# 第一章 绪论

## 1.1 数控系统及数控机床的发展

### 1.1.1 数控系统和数控机床的概念

数控系统是计算机技术在机械制造领域的一种典型应用，它集计算机、机械加工、电子和自动控制等多项技术于一体，是近年来应用领域中发展十分迅速的一项高新技术。数控系统能够逻辑地处理具有控制编码或其他符号指令规定的程序并将其译码，从而使机床动作并加工零件。

我国国家标准（GB8129-87）对“机床数控技术”做了如下定义：“用数字化信号对机床的运动及其加工过程进行控制的一种方法，简称数控(NC)”<sup>[1]</sup>。

数控机床是数字控制机床的简称，是一种装有程序控制系统的自动化机床。从 20 世纪 70 年代以来，以数控机床为代表的现代基础机械已成为制造工业最重要的技术特征，数控机床水平的高低和机床数控化率的高低已成为衡量一个国家工业化水平的重要标志。随着数控技术的发展和在生产过程中的广泛应用，传统的机械工业的产业结构和生产模式发生了深刻的革命性变化，加工精度和速度提高，生产效率大幅度增长，加工品质得到了极大完善，并实现了人工很难做到的对各种复杂工件的自动加工。数控系统的发展也奠定了柔性制造系统(FMS)和计算机集成制造系统(CIMS)的基础<sup>[2]</sup>。

### 1.1.2 数控系统的发展历程

美国麻省理工学院 1952 年研制出第一台试验性数控铣床，到现在已历经半个世纪。随着电子技术和控制技术的飞速发展，当今的数控系统功能已经非常强大，与此同时，加工技术及其他一些相关技术的发展对数控系统的发展和进步也提出了新的要求。纵观这五十多年间，影响数控技术发展最主要的因素是科学技术特别是计算机技术的发展和制造业市场需求的驱动，总结起来分为两个阶段和六个时代<sup>[3]</sup>：

#### 一、 NC（数字控制）阶段

1. 1952 年 MIT 的第一台数控铣床标志着基于电子管和继电器的电子管 NC 时代的开始。

2. 20世纪50年代末,以固定布线的晶体管元器件电路取代了电子管,成为了数控系统的核心,数控技术的发展进入了晶体管NC时代。
3. 1965年出现了第三代数控系统一小、中规模集成电路NC。集成电路可靠性高,批量生产成本很低,广泛被采用在数控系统上。

## 二、CNC(计算机数字控制)阶段

4. 1970年,大规模集成电路的小型通用电子计算机技术诞生,从此开创了CNC时代。
5. 1974年起,微处理器开始应用于数控系统,标志着MNC(微型计算机CNC)时代的开始。微型计算机性价比高,实现了计算机核心部件的高度集成,可靠性高、功能强大、速度快。微型计算机技术应用在数控技术上,使其得到了迅速的发展。现代流行的数控系统大部分还是以微型计算机为核心。
6. 随着PC技术,特别是软件技术的发展,1994年起美国首次出现了基于PC的ONC(开放式CNC),从此数控技术进入了开放式数控时代。

### 1.1.3 数控机床的发展趋势

现代数控机床综合应用机械设计与制造工艺、计算机自动控制技术、精密测量与检测、信息技术、人工智能等技术领域中的最新成果,将朝着高速化、精密化、复合化、柔性化、极端化等方向发展<sup>[4]</sup>。

面临剧烈的市场竞争,制造企业的核心在于高效快速地生产出高质量的能满足消费者动态变化的需求的产品。作为制造企业的基本设备—数控机床也朝着这个核心目标发展,呈现出以下发展情况和趋势:

#### 1. 高精度、高速度、高可靠性

提高生产率是机床技术追求的基本目标之一,最主要、最直接的方法就是提高切削速度。这就要求机床向高速化方向发展,不仅要提高主轴转速和进给速度,还要提高移动速度与加速度,缩短主轴起动、制动时间,减少换刀时间等。高速加工的实现是机床、刀具、夹具、数控编程技术以及人员素质的集成。此外,当代工业产品对加工精度也提出了越来越高的要求,一些零件的尺寸精度要求在微米、亚微米级,因此,加工这些零件的机床也受到需求的牵引而必须向高精度发展,从精密加工发展到超精密加工(特高精度加工),是世界各工业强国致力发展的方向。

精度和速度是数控机床的两个基本指标。精度关系到产品的质量，而速度是生产率的保证。然而，这两项技术指标是互相制约的<sup>[5]</sup>。也就是说，要达到越高的速度，就越难保证精度；要获得越高的精度，越难达到高的速度。20世纪90年代以来，世界各大工业国都注重在高速高精方面的研究，高速主轴单元（电主轴技术，15000~100000rpm）、高速高加减速进给（快移60~120m/min，切削60m/min）和其他高性能数控伺服系统、超精密加工技术的研究也取得了很大的突破，达到了很高的水平<sup>[6]</sup>。

数控机床的可靠性是数控机床产品质量的另一项关键性指标。数控机床能否发挥其高性能、高精度、高效率，关键取决于可靠性。提高数控机床的可靠性是建立现代制造业的必要条件，而数控系统的可靠性要高于被控设备的可靠性一个数量级以上。

## 2. 工艺复合化

数控技术的工艺复合化是指工件在一台机床上一次装夹后，通过自动换刀、旋转主轴头或转台等各种措施，完成多工序、多表面的复合加工；数控技术的多轴化是以减少工序、辅助时间为主要目的的复合加工<sup>[7]</sup>。

增加数控机床的复合加工功能，进一步提高其工序集中度，不仅可减少多工序加工零件上下料的时间，而且可以减少零件在不同机床上进行工序转换而增加的工序间输送和等待时间，易于保证加工过程的高可靠性。此外，复合加工还缩短了加工过程链和辅助时间，减少了机床台数，简化了物料流动，提高了生产设备的柔性。

## 3. 柔性化

产品更新换代和人们对产品多样化、个性化的需求，使得市场对具有良好柔性和多样加工能力的制造系统的需求超过了对大型单一制造系统的需求，这就使得数控机床朝着模块化、可重构、可扩充的柔性化方向发展，也要求在多品种、变批量的环境下保持高效生产。特别是汽车制造业和电子通信设备制造业的发展，对生产效率提出了更高的要求。随着制造过程自动化程度的提高，要求机床不仅能完成通常的加工功能，而且还要具备自动测量、自动上下料、自动换刀、自动误差补偿、自动诊断、进线和联网等功能。柔性化包含数控系统本身的柔性和群控系统的柔性。数控系统采用模块化设计，功能覆盖面大，可裁剪性强，便于满足不同用户的需求；而群控系统能依据不同生产流程的要求，使物料流和信息流自动进行动态调整，从而最大

限度地发挥群控系统的效能。

#### 4. 网络化

随着全球范围内信息化进程的推进，新的诸如柔性制造系统（生产线、流水线）、柔性制造工厂、自动化工厂、虚拟企业、全球制造等制造模式越来越多地被制造业企业所采用。这种新的制造环境对于数控机床的要求就不再是一个独立功能点的存在，而应该是一个网络节点，这就要求数控机床必须具备网络通讯能力。网络化的发展方向促进了数控机床的网络硬件接口技术、网络传输协议技术和网络制造模式技术等相关方面的研究。

#### 5. 智能化、开放性

信息技术的发展使机床朝着数字化和智能化的方向发展。采用智能技术来实现多信息融合下的重构优化的智能决策、过程适应控制、误差补偿智能控制、复杂曲面加工运动轨迹优化控制、故障自诊断和智能维护以及信息集成等功能，将大大提升成形和加工精度。

智能机床的出现，为未来装备制造业实现生产全盘自动化创造了条件。通过自动抑制振动、减少热变形、防止干涉、自动调节润滑油量、减少噪声等，可提高机床的加工精度和效率。数控系统的开发创新，对于机床智能化起到了重大的作用，它能够收容大量信息，并对各种信息进行储存、分析、处理、判断、调节、优化、控制。智能化新一代数控系统将计算机智能技术、网络技术、CAD/CAM、伺服控制、自适应控制、动态数据管理及动态刀具补偿、动态仿真等高新技术融于一体，形成严密的制造过程闭环控制体系。

随着计算机技术日新月异的发展，基于微机的开放式数控系统是数控技术发展的必然趋势。在传统数控技术方面，我国处于相对落后的状态，开放式数控为我国数控产业的发展提供了良好的契机。

#### 6. 环保和极端结构机床

随着能源危机的加剧和日趋严格的环境保护政策的出台，人们对机床的效率、运行成本、环境污染等方面提出了更高的要求。通过减少机床冷却液排放和利用复合新材料或者新结构实现机床轻量化来满足环保和节能的需求是未来的一大趋势。

此外，极端化是指数控机床有朝着极小化和极大化方向发展的趋势。在国防、航空、航天等行业中大型化装备的制造方面，需要大型数控机床，而微纳米技术的发展需要有能适应微小型尺寸加工的新型制造工艺和装备，这

样数控机床会朝着极小化方向发展。

## 1.2 开放式数控系统技术

### 1.2.1 开放式数控系统概念

开放式结构控制器 (OPEN ARCHITECTURE CONTROLLER) 的概念起源于上世纪 80 年代美国国防部发起的下一代控制器(NGC-Next Generation Controller)的研究计划<sup>[8]</sup>。IEEE(美国电气电子工程师协会)关于开放式系统的定义是：能够在多种平台上运行，可以和其他系统互操作，并能给用户提供一种统一风格的交互方式。通俗地讲，开放的目的就是使 NC 控制器与当今的 PC 机类似，其系统构筑于一个开放的平台之上，具有模块化组织结构，允许用户根据需要进行选配和集成，更改或扩展系统的功能以迅速适应不同的应用需求，而且，组成系统的各功能模块可以来源于不同的部件供应商并相互兼容<sup>[9]</sup>。

### 1.2.2 开放式数控系统起源与研究目的

过去日本的 FANUC、德国的 SIEMENS 等大型的 CNC 控制器制造商，为数控机床生产了全部的配套产品，包括 CNC 数控装置、主轴、进给驱动器和电机，使机床生产厂得到了满意的服务，也使这种专用的 CNC 系统成为市场上的主导产品，受到了机床生产厂和用户的欢迎<sup>[10]</sup>。然而，随着数控系统技术和数控机床的不断发展，对于特定功能的需求以及成本等竞争因素的考虑，开放式的数控系统架构越来越受到机床生产厂家和数控系统开发商的重视。

研究开放式数控系统的主要目的是解决变化频繁的需求与封闭控制系统之间的矛盾，从而建立一个统一的可重构的系统平台，增强数控系统的柔性。

### 1.2.3 开放式数控系统的特点及与传统数控系统的比较

开放式数控系统自从 20 世纪 90 年代首次出现以来，就被公认为数控技术最重要的发展发向。其技术特点突出表现在以下几个方面：

#### 1. 开放性

开放式系统应当具有平台无关性，不依赖特定的硬件平台和操作系统平台。用户可以自定义人机界面，系统的功能、规模可以灵活设置，方便修改，

既可以增加硬件或软件构成功能更强的系统，也可以裁减其功能以适应低端应用<sup>[11]</sup>。

## 2. 模块化

模块化的含义有两层，首先是数控功能的模块化，可以根据机床厂的要求选配各个功能；另一层含义是系统体系结构的模块化，即数控系统内部实现各功能的算法是可分离的、可替换的。模块化结构使得控制器具有可互操作性和可移植性。可互操作性是通过提供标准化接口、通信和交互机制，使不同功能模块能以标准的应用程序接口运行于系统平台之上，并获得平等的相互操作能力，协调工作。可移植性是系统的功能软件与设备无关，即应用统一的数据格式、交互模型、控制机理，使构成系统的各功能模块可来源于不同的开发商，并且通过一致的设备接口，使各功能模块能运行于不同供应商提供的硬件平台之上。

## 3. 标准化

标准化包括开发语言以及外部接口的标准化。外部接口包括人机界面接口、NC/PLC 编程接口，与上层系统和下层系统的接口。这些接口应符合国际标准或行业标准。

## 4. 二次开发

开放式控制器应当允许用户进行二次开发。二次开发是具有不同层次的。比较简单的二次开发可以包括用户根据实际情况调整系统的参数设定和进行模块配置，进一步的二次开发包括对用户界面的重新设计，更深层的开发应当允许用户将自己按照规范设计的功能部件集成到系统中去。

如表 1-1，分别在系统结构、软硬件开发、网络、接口等方面对开放式数控系统与传统数控系统进行比较。

表 1-1 开放式数控系统与传统数控系统的比较

比较项	传统数控系统	开放式数控系统
系统结构	硬件、软件专用，扩展性差	基于通用的 PC 硬件标准和软件标准
性能	特定型号的配置固定，不能修改	取决于软硬件配置，可通过核心硬件的更换提高系统性能，软件算法容易升级。
维护性	需随着市场竞争的需要，开发生产专用的硬件	紧跟 PC 市场，方便更替

软件开发	封闭式开发, 软件由 CNC 制造商提供	开放式软件平台
专用系统开发	只能由 CNC 制造商完成, 复杂程度高	使用高级语言和 API, 用户可以二次开发
联网	使用专用硬件和专用通讯技术	PC 通用联网技术, 容易同第三方软件协作
PLC 软件	使用专用语言, 难以移植, 要求维护人员素质高	标准 PLC 语言, 移植性强, 容易掌握
接口	专用接口, 不可互换	标准化接口, 可与通用伺服和 I/O 模块连接
成本	CNC 制造商根据竞争需求制定, 维修成本虚高	通用性硬件, 成本可控
稳定性	专用硬件和软件, 可靠性高	兼容性高, 硬件开放, 成熟期长

#### 1.2.4 国内外开放式系统的发展研究动态

如上所述, 开放式数控系统较传统数控系统有着全方面的优势, 这些优势又决定了其良好的发展趋势, 在短短的几年间, 世界各国不断投入和进行着大量的研究、开发和应用, 推动着开放式系统技术的迅速发展。其中最为典型的有:

1. 美国的“下一代控制器计划 (NGC)”和“开放式模块化体系结构控制器 (OMAC)”

美国是开放式数控系统的发起人。早在 1987 年就提出了 NGC 计划, 其核心在于基于相互操作和分组式软件模块理念的“开放式系统体系结构标准规范 (SOSAS)”。1994 年又开始了 OMAC 计划。另外, 美国的一些 CNC 厂商对“开放式”也有自己的理解和产品, 比如 Deta Tau 公司的“可编程多轴控制器 PMAC”和本文所介绍的 Soft Servo System 公司的 ServoWorks CNC 技术。

2. 欧共体的“信息技术研究发展战略计划 (ESPRIT)”及“开放式控制系统体系结构 (OSACA)”<sup>[12]</sup>

1990 年欧共体发起了 OSACA 计划, 关注三个关键问题:

- (1) 参考体系结构;
- (2) 通信系统;
- (3) 配置系统。

3. 日本的“控制器开放系统环境计划 (OSEC)”

日本是世界上最大的机床出口国，对开放式数控系统的研究十分重视。

OSEC 开始于 1994 年，重点在以下几个技术领域开展研究：

- (1) 开放控制器的意义和方向；
- (2) 开放式 NC 的基本体系结构；
- (3) 自动工厂的记述语言—FADL；
- (4) 伺服控制的函数程序库。

#### 4. 我国的“开放式数字控制系统（ONC）”

虽然目前我国还没有制定出开放式数控系统的标准规范，但是已经进行了一定的探索，已经开发出来的有华中Ⅰ型数控系统和蓝天系统<sup>[13]</sup>。

### 1.2.5 开放式数控系统架构

从结构上来看，开放式数控系统的实现方式有以下三种基本形式：

#### 1. PC 嵌入 NC 型

该类型系统是将 PC 装入到 NC 内部，PC 与 NC 之间用专用的总线连接。系统数据传输快，响应迅速，同时，原型 NC 系统也可不加修改就得以利用。这种数控系统尽管具有一定的开放性，但由于它的 NC 部分仍然是传统的数控系统，其体系结构还是不开放的。PC 前端将丰富的 PC 硬件软件资源融入数控系统，完成系统的非实时任务；后台 NC 完成系统的实时控制功能，可保留其成熟可靠的性能。

采用这种结构的数控系统主要出自知名 CNC 厂商，在不愿放弃成熟的传统 NC 技术而又需要 PC 的开放性时采取的一种折衷解决方案<sup>[14]</sup>。典型代表有日本 FANUC 的 18i 系统、德国 SIEMENS 的 840D 系统、法国 NUM 公司的 1060 系统等<sup>[15]</sup>。

#### 2. NC 嵌入 PC 型

该类型系统以通用 PC 架构为基本平台，将具有标准 PC 接口（如 ISA、PCI）的 NC 控制板或整个 CNC 单元插入 PC 主板扩展槽中形成开放式数控系统。PC 完成人机界面、数据通信及 NC 功能调用等非实时任务，NC 扩展卡完成运动控制和 PLC 控制等实时任务。这种方法能够方便地实现人机界面的开放化和个性化。

NC 扩展卡一般选用高速的 DSP 芯片作为 NC 的 CPU，其标准的函数库可供用户在操作系统平台下二次开发所需要的功能。

就开放程度而言,这种方式比 PC 嵌入 NC 式数控系统要高,得到了广泛的应用。较为典型的系统有日本 MAZAK 公司基于日本 MITSUBISHI 公司 Meldas 64 的 MAZATROL 640 系统和美国 Delta Tau 公司基于 PMAC 多轴运动控制卡的 PMAC-NC 系统。

### 3. 纯软件型

纯软件型开放式 CNC 的全部核心功能(包括插补运算、加减速运算、PLC 等实时任务)均由运行在 PC 硬件平台上的软件实现。这类系统借助现有的操作系统平台(如 DOS, Windows 等),在应用软件(如 Visual C++, Visual Basic 等)的支持下,通过对 NC 软件的适当组织、划分、规范和开发,可望实现上述各个层次的开放。并且通过安装在 PC 主板扩展槽上的通讯接口板与伺服系统或输入输出点进行连接。

这种实现形式的数控系统在软件上基于操作系统编程标准,在硬件上基于通用 PC 硬件标准,所以在理论上可以实现完全开放。目前典型的产品有:美国 MDSI 公司的 Open CNC、德国 Power Automation 公司的 PA80000NT、德国 Beckhoff Automation 公司的 TwinCAT 和本文所介绍的美国 Soft Servo System 公司的 ServoWork。

#### 1.2.6 开放式数控系统的问题

数控系统要实现开放性结构,主要需要解决以下几个关键性的问题:

1. 制定一个开放式数控系统的制造协议;
2. 实现系统硬件的模块化、标准化和系列化;
3. 构造一种独立于硬件系统的软件平台。

目前看来,大多数开放式数控系统研发和生产厂商都只能完成第三点,尽可能的降低软件的硬件相关性,在硬件选择上表现开放的态度。然而,由于没有接近成熟的标准和协议,第一和第二点都只能停留在研讨阶段。只有当第一和第二点逐步走向成熟,开放式数控系统才能真正得到长足的发展,才能在市场份额和核心竞争力上与传统数控系统一较高低。

## 1.3 课题概论

### 1.3.1 选题背景

从近年来各大机床展会上可以看到,国外著名数控系统都已经开发出开放式数控系统并且投入使用,如 SIMENSE 840D、FANUC 32i、MITSUBISHI M700 等;国外著名机床生产厂商的主流型号机床也均采用这些高性能开放式系统,如德国 DMG, 日本 MAZAK 等。

随着数控技术的不断发展,传统数控系统已不能适应当今制造业市场的变化与竞争,也不能满足现代制造业向信息化、敏捷模式发展的需要。这就迫切需要开发具有开放性、性能稳定、价格低廉的新型数控系统。开放式数控系统已经是数控系统发展趋势,而且是实现数控系统其他技术发展的有效途径。

美国 Soft Servo System 公司的 ServoWorks CNC 技术是一项能够实现纯软件开放式的数控系统方案。该技术源自 MIT 的“下一代控制器”计划,核心算法成熟,性能出色,是一个高柔性、低成本的控制系统。该技术在日本和中国与知名的机床生产厂商和研究机构共同合作,已经开发了相对成熟的数控系统和数控机床产品,并提供源源不断的技术更新和支持。

厦门大学作为 Soft Servo System 公司在中国的合作研究机构之一,共同参与 ServoWorks CNC 技术的应用开发与核心测试已有 3 年多的时间。针对在目前中国数控机床市场上普通三轴加工中心的市场份额最大,应用前景广阔的情况, ServoWorks CNC 纯软件开放式数控系统在三轴加工中心的应用研究已达两年多的时间,在这段时间里,通过自身的不断改进和与传统数控系统的比较,此开放式数控系统已基本达到了稳定性和精度的使用要求。开展本课题研究的目的在于:

1. 全面研究纯软件型开放式 ServoWorks CNC 技术。
2. 掌握将其应用在各种数控机床上的二次开发技术。
3. 深入内核研究,掌握纯软件型开放式数控系统的实现技术。
4. 针对三轴加工中心,提供完善且成熟的数控系统整体解决方案。

本课题的开展具有理论学习和实践创新的意义。通过对 ServoWorks CNC 技术的深入研究,可以了解世界一流的开放性数控系统技术,积累数控核心部件开发能力的技术储备。此外,通过在普通三轴加工中心上的应用,可以在实践中

发现纯软件开放式数控系统的优缺点,针对竞争激烈的市场推出更具性价比的产品。

### 1.3.2 课题的工作进程

根据项目的总体目标,课题的开展至今天略经历了以下几个阶段:

1. 对 ServoWorks CNC 技术进行基础研究,掌握 ServoWorks CNC 应用开发的关键技术。
2. 进行基于 ServoWorks CNC 技术的加工中心数控系统的软件和硬件开发。
3. 对基于 ServoWorks CNC 技术的加工中心进行整机测试,并针对存在问题加以改进。

### 1.3.3 论文的全文组织

本论文是对 ServoWorks CNC 技术研究工作的阶段性总结,全文共分五个章节:

第一章 绪论,回顾和展望数控系统和机床的发展,介绍纯软件开放式数控系统技术的基础知识和课题背景。

第二章 纯软件开放式 ServoWorks CNC 技术的研究,主要对 ServoWorks 的软硬件技术进行全面分析研究,包括 ServoWorks 运行的操作系统平台、ServoWorks 的软件系统、ServoWorks 数据通讯硬件平台。

第三章 针对具体的三轴立式加工中心,利用纯软件开放式 ServoWorks CNC 技术开发其系统界面和系统功能,并进行实际电气连接和 PLC 的编写。

第四章 三轴立式加工中心的整机调试,包括工程的进度安排、电气调试、系统参数的设定和伺服精度的调整。

第五章 总结与展望,对课题的研究成果进行总结,并对后继的工作进行展望。

## 第二章 纯软件开放式 ServoWorks CNC 技术的研究

### 2.1 概述

ServoWorks CNC 是一种纯软件开放式数字运动控制技术, 这种创新型的基于 PC 的技术拥有一种独特且开放的架构, 即充分利用电脑的 CPU 来完成软件的功能实现, 同时尽可能的减少对硬件的依赖和需求。ServoWorks CNC 技术利用当今普遍使用的普通 PC 中的高性能 CPU 对伺服进行实时控制和与 CNC 控制相关的数控运算以及功能实现, 包括反馈循环、加减速运算、多轴插补、G 码编译、与 PLC 的协同运作、人机界面、网络通讯和其他基于此技术的应用程序<sup>[16]</sup>。 ServoWorks CNC 借力于高速发展的 PC 机性能和快速提高的 CPU 运算能力, 当它们处理能力增加时, 数字运动控制的性能也能大幅增加。

ServoWorks CNC 的开放式架构使得开发者甚至使用者能够自主或参与选择和搭建自己的 CNC 产品, 将自己独特的产品理念融入其中。相对于传统 NC 提供商的优先权理念和黑匣子科技来说, 这无疑是一种革命性的突破。然而, 在现阶段, 开放式数控系统仍然要依循相对固定的软件架构和接口平台。

ServoWorks CNC 技术构成包括数控系统软件技术和硬件平台技术, 如图 2-1 所示。

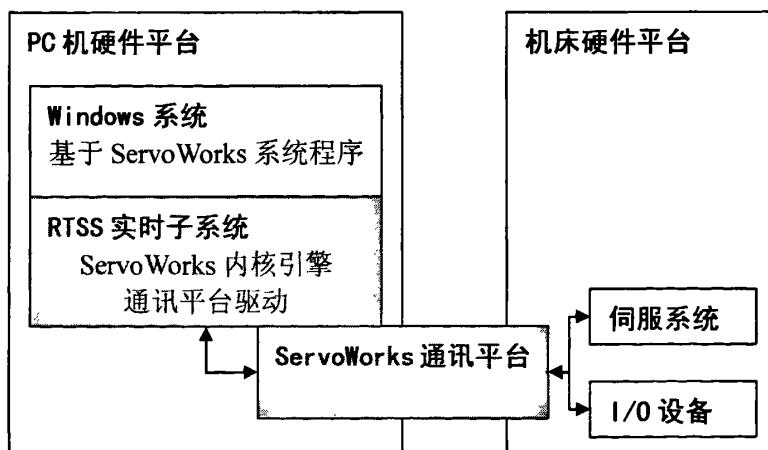


图 2-1 ServoWorks CNC 技术构成

基于 ServoWorks CNC 技术的数控系统运行在使用 Ardence 公司的 RTX 技术扩展了实时功能的 Windows 系统中。

基于 ServoWorks CNC 技术的 PLC 也是纯软件式的，采用相对标准化的语言编写，基本命令齐全，功能指令丰富。此外最重要的一点是，用户可以利用 SDK 开发基于 ServoWorksCNC 技术的数控系统和相关应用程序，实现功能和界面的自定义。

基于 ServoWorks CNC 技术的硬件负责伺服数据的传输和 PLC 数据的采集，目前已经开发出通用平台和专用平台，不仅兼容大部分的通用伺服系统，而且支持当今市场流行的各大品牌伺服系统，如三菱，安川，松下等。能够兼容和使用的通讯平台还在不断增加中，而且接口技术将与当前的一些流行总线共同发展和进步，这一点也是传统数控的自成体系的封闭性结构所无法办到的。

## 2.2 ServoWorks 技术的硬件和操作系统平台

### 2.2.1 ServoWorks 技术的硬件平台

ServoWorks 是基于 PC-based 解决方案的软件 CNC 技术，它可以使用普通的工控机甚至在保证电源稳定的情况下使用普通个人电脑就可以实现。它直接利用电脑的 CPU 和内存进行数据的运算和存储，利用显卡进行人机界面的显示。对于硬件的基本需求如下：

- CPU:

最小需求: Intel Pentium III 1 GHz 或同等级;

建议需求或使用3D-DLACC (三维动态前瞻轮廓控制)时的最小需求: Intel Pentium IV 2 GHz 或更快;

- 内存 (RAM): 128 MB (建议256 MB);

- 硬盘空间需求: 30 MB;

- 根据不同的通讯硬件，需要一个ISA 总线插槽或PCI插槽或PC104接口或 Ethernet网卡接口；

- Ethernet网卡连接: 10 MB/sec or 100 MB/sec;

- 显卡:

256-color 图形显示卡;

800 x 600 像素分辨率 (建议1024 x 768)，另有少量显卡不兼容。

从上述硬件需求可以看出, ServoWorks 纯软件开放式数控系统对硬件的要求充分体现了高开放性和兼容性, 而目前主流的 PC 配置会远远高于此硬件要求, 能够提供更好的运算速度、存储容量和显示效果。例如, 选用双核 CPU+2G 内存+SSD 固态硬盘的 PC 硬件, 将使得开放式数控系统的运算性能和速度达到传统数控无法企及的高度。

### 2.2.2 ServoWorks 技术的操作系统平台

一般来说, 纯软件开放式数控系统可以运行在目前通用的 PC 微机操作系统平台之上。这样的设计理念可以直接利用现有的 PC 软硬件资源, 大大减少纯软件开放式数控系统的开发难度。

与通用 PC 上的操作系统比较, 作为纯软件开放式数控系统的操作系统平台应具有以下几个特点:

1. 高可靠性;
2. 苛刻的实时性;
3. 多进程、多线程、多任务;
4. 专用性较高。

除了以上几点, 操作系统平台的选择还要考虑其他方面的因素, 如开发的便利性、开发成本低等<sup>[17]</sup>。

ServoWorks CNC 技术可以运行在 Windows 2000、Windows XP 或者 Windows XPe 操作系统之上。它们的区别如下:

1. **Windows 2000:** 原名 Windows NT 5.0, 是微软公司产品研发投入最大的一个产品之一。它的稳定性和简单化使其成为开放式数控系统在考虑稳定性和低硬件配置的情形下的首选。
2. **Windows XP:** WindowsXP 是基于 Windows2000 代码的产品, 它包括了简化了的 Windows2000 的用户安全特性, 2008 年, Windows XP 在中国市场占有率高达 95%, 拥有最广泛的用户群和最多的第三方软件提供商。它的第三方软件支持和熟悉的图形用户界面使其成为开放式数控系统的最普遍系统平台。
3. **Windows XPe:** Windows XP Embedded 和 Windows XP Professional 拥有相同的核心, 所以它可以具备 XP Professional 的所有功能及应用软件的兼容性。XP Embedded 拥有系统内核小、占用系统资源少、启动速

度快、增强写保护等 **XP** 系统所不具备的功能。然而，**Windows XPe** 需要在系统平台配置和安装方面做很多的工作，不像 **Windows XP** 那么便捷。但是，如果更多的考虑系统速度和稳定性，则 **Windows XPe** 是开放式数控系统的最佳选择之一。

本文中开放式数控系统选择的操作系统平台是 **Windows XP Professional**，进行了很多的系统优化，尽量做到纯净化和精简系统服务。

### 2.2.3 Ardence RTX 实时扩展子系统

数控系统的控制要求其具有实时性，但 **Windows** 并不是一种实时系统，无法直接应用于数控系统<sup>[18]</sup>。所谓的实时是在一个确定的有限时间里对外部产生的随机事件作出响应，并在确定的时间里完成这种响应或处理<sup>[19]</sup>。评价一个实时系统，重要的不仅看它能否完成一个任务，更重要的是看它能否在指定的时间内完成一个任务<sup>[20]</sup>。

为了能使 **Windows** 系统适用于纯软件开放式数控系统，Soft Servo System 公司利用美国 Ardence 公司的 **Windows** 系统实时扩展技术，通过 RTX 软件扩展了 **Windows** 系统的实时性，使之符合数控系统的实时性要求。

RTX 软件是 Ardence 公司针对 **Windows** 实时扩展问题的专门解决方案。RTX 不改变 **Windows** 原来多任务多进程的工作方式，而是在 **Windows** 的硬件抽象层上进一步扩展出 RTX 硬件抽象层，并且在此基础上形成了 RTSS (RealTime Subsystem，实时子系统)，提供标准的 DLL 供其他应用程序调用。经过 RTX 扩展之后的 **Windows** 系统结构如 图 2-2 所示<sup>[21]</sup>。

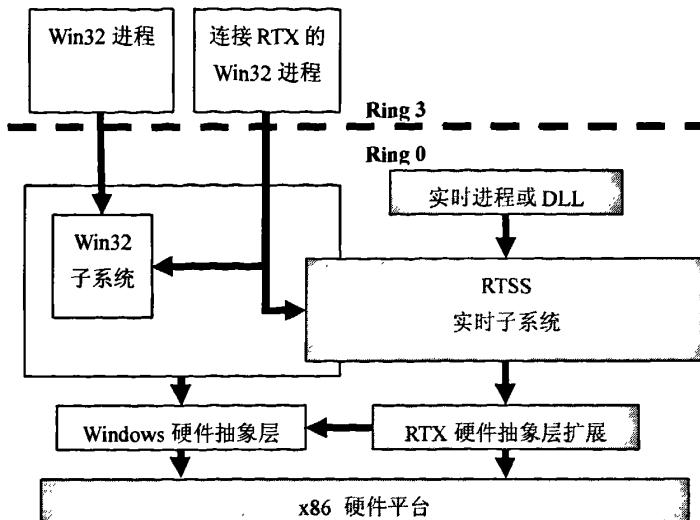


图 2-2 Windows 操作系统的 RTX 实时扩展方案

从图中可以看出，RTX 通过直接调用 IRQ、系统 I/O 或内存来实现程序运行的实时性。而且 RTX 内核运行在系统的 Ring0 级别，保证了所有的 RTSS 线程都要优于 Windows 线程。RTX 通过这种架构保证了当 Windows 系统崩溃（或者系统出现“蓝屏”错误）时，RTSS 的进程都还能保持其良好正常的运行状态。

## 2.3 ServoWorks CNC 软件架构

### 2.3.1 ServoWorks CNC 软件架构概述

ServoWorks CNC 的软件包含三层架构：

1. 下层包含三个实时模块：CNC 运动引擎，PLC 引擎和 G 代码编译器。这三个模块完全集成，运行在 RTSS (RealTime Subsystem, 实时子系统) 中，执行运动控制中的最关键的功能。电脑的 CPU 给予此层最高的优先权。
2. 中间层是 ServoWorks 实时 DLL (Dynamic Link Library) 动态连接库，为运行在实时子系统中的 CNC 引擎内核和运行在 Win32 子系统中的用户程序之间提供无缝链接的接口。
3. 上层是运行在 Win32 子系统中的 CNC 控制器（如本文的 S100M），这些控制器专注于处理状态显示、程序装载和修改、用户界面和文件管理等等非实时性的功能。然而，这些功能的执行与实时的运动控制是同步

的。完整的 ServoWorks CNC 的软件体系结构如图 2-3 所示。

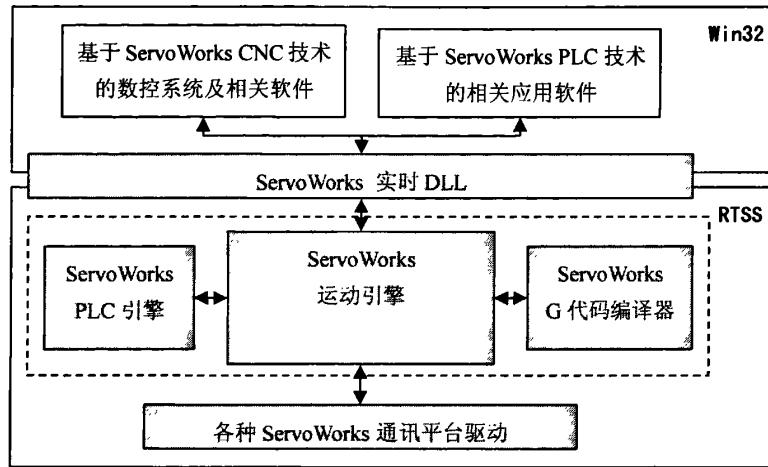


图 2-3 ServoWorks CNC 软件技术模块图

ServoWorks CNC 的软件技术包括四部分：ServoWorks 引擎内核、各种 ServoWorks 通讯平台驱动、ServoWorks DLL 和 SDK (ServoWorks Develop Kit, ServoWorks 二次开发工具包)。

### 2.3.2 ServoWorks 引擎内核

ServoWorks 引擎内核包含三部分，但是只有运动引擎是必须的，其它的并不是必须的，例如运动控制中可以不需要 G 代码编译器。

#### 2.3.2.1 ServoWorks 运动引擎

ServoWorks 运动引擎是一个高实时性的运动控制数据处理软件模块，是 ServoWorks 系统的内核中枢。它不仅要进行所有运动控制相关运算：多轴联动、NC 程序路径生成、插补运算、加/减速运算、位置控制、补偿、高速的速度反馈与位置反馈信息闭环处理等等，而且还要负责协调 ServoWorks DLL、通讯平台驱动以及与 PLC 引擎和 G 代码编译器的通讯。其内部结构如 图 2-4 所示。

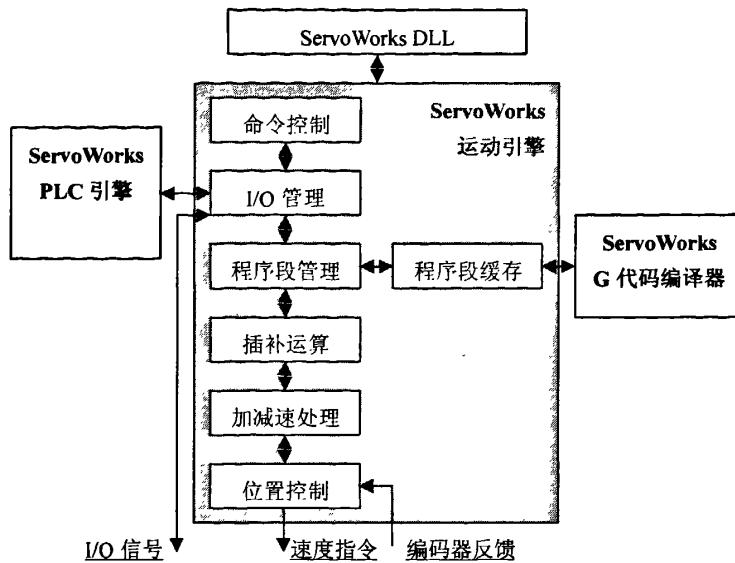


图 2-4 ServoWorks 运动引擎

### 2.3.2.2 ServoWorks G 代码解释器

ServoWorks 系统将零件加工程序 (G 代码程序) 文件读入后, 就通过 G 代码编译器对其进行实时的 G 代码编译处理, 先分析基本 G 代码加工程序语法, 然后将每条语句压入数据表以便 ServoWorks 运动引擎读取。

ServoWorks G 代码编译器支持可选择暂停、子程序调用、机床坐标/工件坐标/本地坐标/相对坐标等不同坐标系、MST 功能等基本功能<sup>[22]</sup>。同时借助 PC 机强大的数据运算能力, 还具备了每秒 1000 段的高速语句编译处理能力, 这是基于 ServoWorks 技术的数控系统实现高速加工的基础。

### 2.3.2.3 ServoWorks PLC 引擎

ServoWorks PLC 引擎与 LadderWorks 控制台及相关应用程序组成了 ServoWorks CNC 系统的内置软件式 PLC 系统。

ServoWorks PLC 引擎执行高速的扫描循环 (一般周期运行为 5ms, 最快可达 1ms)。这个实时 PLC 软件模块负责从 ServoWorks 运动引擎接收其运行状态地址 F 和机床 I/O 设备的输入地址 X, 经过用户装载的 PLC 逻辑程序对输入地址进行运算, 再将机床 I/O 设备的输出地址 Y 和控制 ServoWorks 运动引擎运行状态的指令地址 G 反馈回去, 如图 2-5 所示<sup>[23]</sup>。

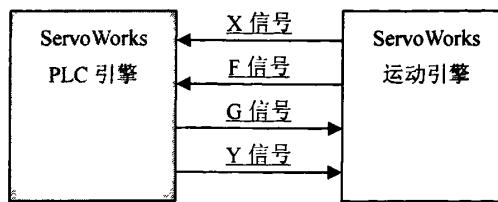


图 2-5 ServoWorks PLC 引擎

### 2.3.3 ServoWorks 实时 DLL

ServoWorks DLL 为基于 ServoWorks CNC 技术的应用程序与 ServoWorks 内核引擎提供通讯接口。一般用户除了可以基于 ServoWorks DLL 和 SDK 开发运行在 Windows 系统下的相关程序,甚至还可以开发基于 RTSS 的设备驱动(用户开发自定义的实时设备驱动,可以对系统进行额外的 DSP 芯片扩展)。

### 2.3.4 ServoWorks Develop Kit 二次开发包

SDK 是实现 ServoWorks CNC 技术开放性的重要工具,不仅包括了供开发者进行基于 ServoWorks CNC 技术的数控系统开发所需要的 API 函数库,而且还提供 API 函数本身的源程序,可供开发者进行 API 函数的二次开发。

SDK 包括以下组件:

- SWAPI 针对 C/ C++或 Visual Studio 或 Delphi 的函数库。
- SWAPI RTX, 用户可以开发监测实时运动和 IO 状态的程序。
- 可操作所有实时进程和资源的 API 函数库, 包括: 设备处理、系统初始化、参数设定、NC 控制命令、手动操作命令、自动操作命令、测试命令、IO 命令、PLC 指令、NC 和伺服状态监视等。用户利用 SWAPI 源程序, 可对 ServoWorks API 进行二次开发, 实现 API 的自定义。

## 2.4 ServoWorks CNC 通讯硬件平台

### 2.4.1 ServoWorks CNC 硬件技术概述

ServoWorks CNC 为纯软件型 ONC 技术,所有运动控制运算和 PLC 逻辑控制运算都由 ServoWorks 软件系统完成,其硬件部分只完成伺服数据和 I/O 信

号的传输功能，故称之为“伺服 I/O 通讯平台”<sup>[24]</sup>。ServoWorks 伺服 I/O 通讯平台的结构如图 2-6 所示。

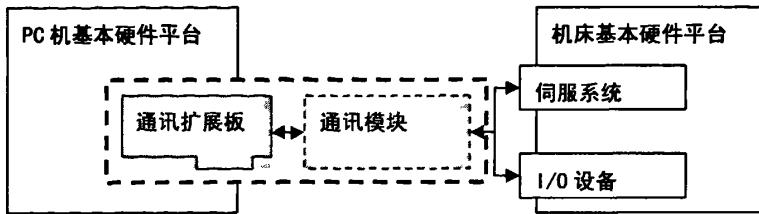


图 2-6 ServoWorks 伺服 I/O 通讯平台结构简图

ServoWorks 通讯平台简单的由通讯扩展板和通讯模块组成，通讯模块负责机床端的数据编码解码以及与伺服 I/O 的连接，某些类型的平台甚至没有通讯模块。通讯扩展板负责 PC 端的数据编码解码，一般由标准的 PCI 总线接口或 ISA 总线接口接入 PC 系统，由运行在 RTOS 实时子系统中的驱动程序驱动，保证通讯平台运行的实时性。

为了使 ServoWorks 与市场上流行的大部分伺服系统兼容，ServoWorks 的伺服 I/O 通讯平台分为通用与总线两大类。目前，通用的通讯平台包括“VersioBus 光纤数字网络”、以及“EtherCAT”两种；总线通讯平台有适用于安川伺服系统的“MECHATROLINK 伺服 I/O 网络”<sup>[25]</sup>、适用于松下伺服系统的“RTEX 伺服网络”和适用于三菱伺服系统的“SSCNET 伺服网络”。

#### 2.4.2 VersioBus 光纤数字网络

VersioBus 光纤数字网络通讯平台是通用伺服 I/O 通讯平台。VersioBus 通讯平台借助光纤通讯，能达到 10Mbps 的高速双工数据传输能力，能够同时最多连接 16 个伺服轴以及最多 416 个通用 I/O 点到数控系统。其总体结构如图 2-7 所示。

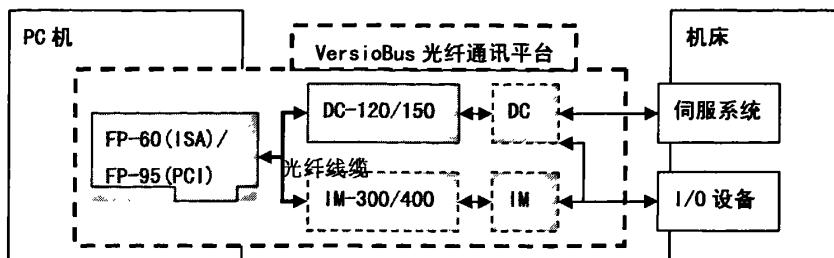


图 2-7 VersioBus 光纤数字网络通讯平台结构图

该平台的基本组成部分为：FP 板卡、光纤线缆、DC 模块和 IM 模块。

FP 板卡为 PC 端接口卡，FP 板的作用是由运行在 RTOS 上的 FP 驱动程序驱动，通过 FPGA（现场可编程门阵列）技术对数据进行编码和译码后与手轮设备、本地 I/O 设备、DC 模块和 IM 模块通讯。

光纤线缆是一条最长为 10 米的双芯光纤。用于进行 FP 板卡与 DC 模块的连接、FP 板卡与 IM 模块之间的连接、DC 模块之间的连接和 FP 模块之间的连接，实现双方之间的双工通讯。光纤线缆本身具有很强的抗干扰能力，特别适用于工业控制领域。

DC 模块为机床侧接口模块，通过 FPGA（现场可编程门阵列）技术对数据进行编码和译码后与 FP 板、伺服系统、机床设备和下一个 DC 模块(如果有配备的话)进行通讯。内部结构如图 2-8 所示。

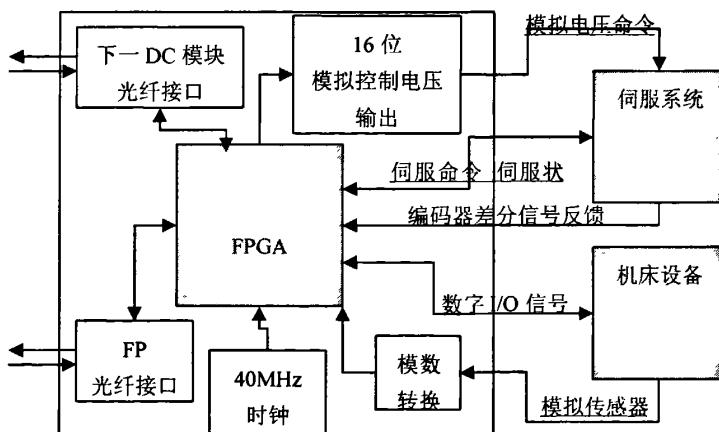


图 2-8 DC 模块内部功能模块图

由上面的功能模块图可以看出，VersioBus 对伺服的控制可以通过脉冲命

令方式、模拟量方式和位置指令方式。这使得 ServoWorks 能够与任何通用控制方式的伺服系统连接和控制。

一个 DC 模块可进行 4 个伺服轴的连接, 可通过扩展 DC 模块数量实现与更多轴数的伺服连接。DC 模块上的两个 I/O 连接口共提供了 16 点 + 16 点基本 I/O 点和 3 点  $\times$  4 轴 = 12 点的伺服相关 I/O (伺服轴的正、负极限信号和零点信号)。

IM 模块为 I/O 扩展模块。如果由 FP 板卡和 DC 模块提供的 I/O 点还不够使用的话, 可以通过 IM 模块来扩展。一个 IM 模块可扩展 32 点输入 + 32 点输出的数字 I/O<sup>[26]</sup>。

#### 2.4.3 EtherCAT 通讯平台

EtherCAT (以太网控制自动化技术) 是一种用于确定性以太网的高性能工业通信协议, 它扩展了 IEEE 802.3 以太网标准, 使得数据传输中具有可预测性定时及高精度同步等特点<sup>[27]</sup>。

如图 2-9 所示, 使用这种通讯平台时, RJ45 的以太网接头直接连接在 PC 的网卡接口上, 伺服驱动器以一条简单的单向链串接起来, 而不再需要其它的任何硬件。

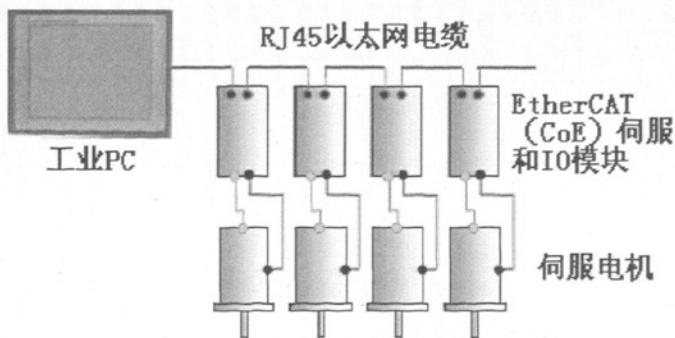


图 2-9 EtherCAT 通讯平台结构图

它的特点有:

- 超级快的速率—32 个伺服轴的控制周期时间为 0.5ms。
- 简单的布线—使用网络线缆以单向链的方式串接。
- 非常低的硬件成本—不需要接口卡、集线器等等。
- 使用成熟的以太网技术。
- 不同的伺服和 I/O 产品可以互相连接。

EtherCAT 平台的配置非常简便，使用标准线缆并且不用接口卡，而且控制周期时间有了成倍的提高。虽然目前几乎没有中国的伺服和 I/O 厂家提供相应的产品，但是这种 EtherCAT 技术相信在将来一定能成为开放式数控系统的一个极具性价比的选择。

#### 2.4.4 专用通讯平台

除了通用的伺服 I/O 通讯平台，Soft Servo System 也提供了适用于市场上流行的伺服系统专用的总线通讯平台。目前主要有三种：松下 RTEX 伺服网络（如图 2-10 所示）、安川 MECHATROLINK 伺服 I/O 网络（如图 2-11 所示）和三菱的 SSCNET 伺服网络。

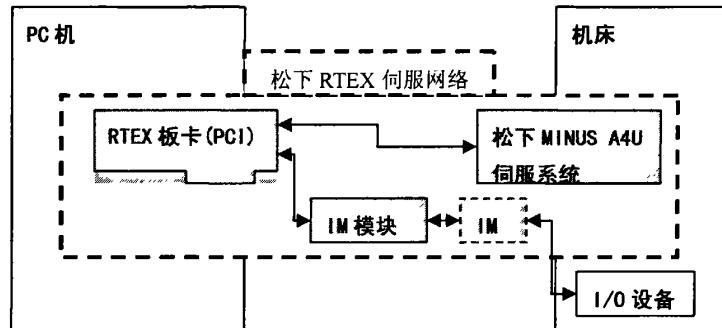


图 2-10 松下 RTEX 伺服网络结构图

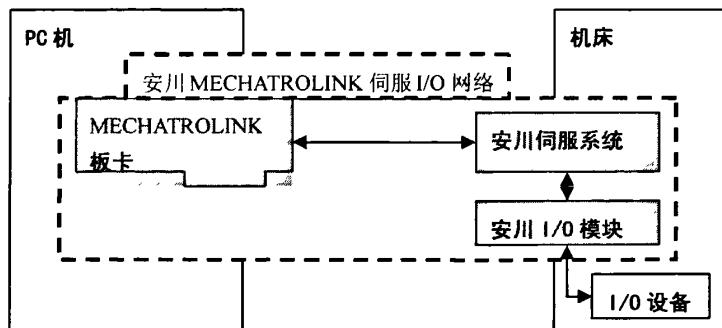


图 2-11 安川 MECHATROLINK 伺服 I/O 网络结构图

## 2.5 本章小结

作为开放程度最高的一种架构，**ServoWorks** 这种纯软件式数控系统充分利用了软件的灵活性和普通 PC 强大的数据处理能力，极大地提高了运动控制速度和精度，体现了优越的系统性能。

**ServoWorks** 选择最流行的、软硬件资源最为丰富的 **Windows** 操作系统作为平台，利用 **RTX** 软件的扩展实现数控系统的实时性要求。**ServoWorks** 的通讯平台技术能够兼容市场上大部分通用的伺服系统，甚至可以直接利用通用的 PC 硬件资源实现数控系统零硬件化。此外，二次开发的能力使得开发者和用户能够灵活的编写属于自己的控制器。

本章通过大量的相关资料，对 **ServoWorks CNC** 技术从理论到架构实现进行了研究，为更具体的开发提供了指导性的方向。

## 第三章 基于 ServoWorks CNC 技术的立式加工中心数控系统开发

### 3.1 立式加工中心机床概述

三轴联动立式加工中心是本文所述开放式数控系统的硬件平台，机床光机使用米汉娜铸铁，采用滚珠丝杆和硬轨，刚性好，机械精度高。

#### 3.1.1 加工中心

加工中心(Machining Center, MC)是一种全功能的数控机床。它将铣、镗、钻和螺纹切削等功能集中于一体，具有多种工艺功能。

加工中心配套刀库机构，能够存放一定数量的各种刀具，在加工过程中按程序指令要求自动更换刀具进行连续性加工。多轴联动功能也是加工中心的显著特点之一，它使加工中心拥有进行复杂的曲面加工的能力<sup>[28]</sup>。

#### 3.1.2 加工中心功能特点

加工中心具有以下特点：

- 点位、直线、轮廓、曲面运动功能
- 一般采用伺服编码器信息反馈的半闭环或光栅尺位置信息反馈的全闭环控制方式保证高的加工精度
- 具有多功能的机床辅助机构来实现一体性和实时性的功能复合，保证高的生产效率。例如除了刀库机构之外还有自动交换工作台机构、自动上下料机器人机构……
- 具有一定的网络联网能力，适合现代化管理：DNC 计算机直接控制方式、FTP 文件传输方式、基于 PC 开放式数控系统的网络功能。
- 能进行多种插补运算和补偿方式
- 高速高精的加工质量保证，如前馈补偿技术、动态轮廓前瞻技术
- 特别的主轴功能，如主轴定位功能和主轴 C 轴功能
- 支持刀具管理系统
- 高开放性的功能扩展能力，能够支持加工中心数控系统的相关辅助程序

开发。

- 丰富的通讯，特别是网络通讯方式。

### 3.1.3 三轴立式加工中心硬件构成

本文中三轴联动立式加工中心由漳州运元数控机床制造有限公司生产，铸件采用树脂砂铸件，经过两次人工时效处理，强度高，各项机械装配精度稳定可靠。如图 3-1 所示，三轴联动立式加工中心可实现 X、Y、Z 三轴联动：X、Y 方向作水平运动；刀具通过刀柄夹持在机床主轴上，主轴带动刀具旋转，并可作上、下运动形成 Z 轴<sup>[29]</sup>。

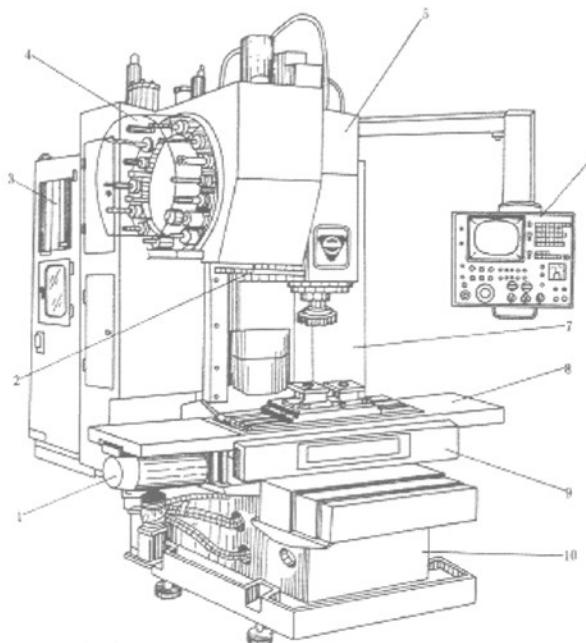


图 3-1 三轴联动立式加工中心示意图

1-X 轴伺服电机 2-换刀机械手 3-数控柜 4-盘式刀库  
5-主轴箱 6-操作面板 7-驱动电源柜 8-工作台 9-滑座 10-床身

此机床带有可装 24 把刀的刀臂式刀库，可通过 PLC 和宏程序控制实现快速换刀。

### 3.2 基于 ServoWorks CNC 技术的数控系统 S100M

纯软件开放式数控系统 S100M 针对三轴联动加工中心所需的功能进行设计, 它构建于 ServoWorks CNC 内核之上, 内含 CNC 部分的机床操作方式的选择、机床运行信息的显示、系统参数设置、机床控制功能的实现等模块和 PLC 部分的 PLC 程序更改、监视、设置等。如图 3-2 所示。

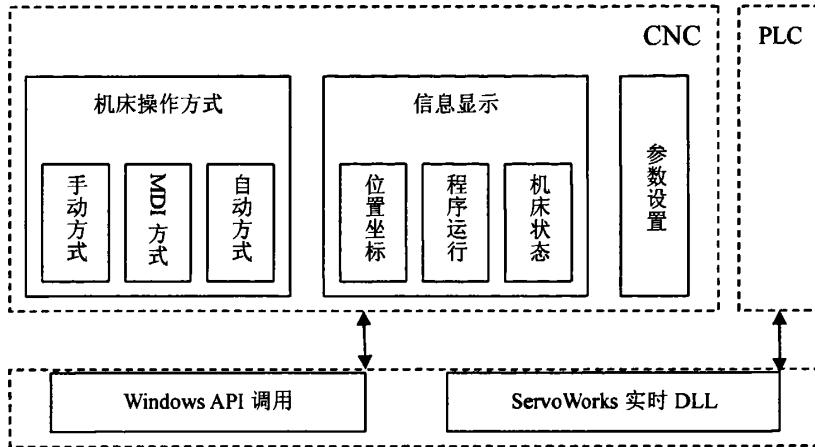


图 3-2 基于 ServoWorks CNC 技术的数控系统功能模块图

S100M 数控系统是在 Visual Basic 6.0 编程环境下, 使用各种已定义或者自定义的 API 函数调用 ServoWorks 运动引擎、PLC 引擎和 G 代码编译器, 完成各项功能的设计。

#### 3.2.1 系统激活授权确认

越来越多的机床厂家希望数控系统能提供定时锁机及激活的功能, 以适应客户按揭付款的需求。因此, 系统将使每台工控机唯一的机器码、使用天数限制和事先分配好的 PIK 号码通过加密算法产生一个激活授权并保存在客户机中。每次启动系统之前, 授权认证程序都将比较激活授权的天数和已经使用的天数, 来决定是否到了锁机的时间。

机床厂商则可以通过密匙软件来生成这个激活授权, 如图 3-3 所示:

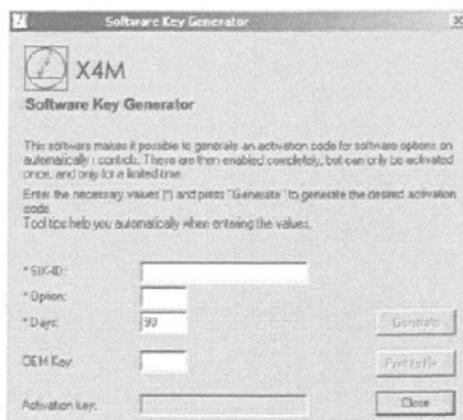


图 3-3 S100M 密匙软件界面图

### 3.2.2 ServoWorks 引擎内核的初始化

应用软件的运行首先要实现对 ServoWorks 内核的初始化和 RTX 引擎的启动。ServoWorks 内核的初始化包括 ServoWorks 设备打开和系统参数加载，流程如图 3-4 所示。系统初始化和 RTX 引擎启动成功后，设置系统操作模式，打开中断循环并与远程设备建立通讯。程序主循环过程中断状态正常时，打开 PLC 引擎并将伺服电机使能。在不同操作模式下，根据实际需用编写界面操作程序。软件编写过程中，通过 SDK 二次开发包提供的 API 调用语句和动态链接文件 DLL，可实时读取界面操作所需要的引擎状态和系统信息。

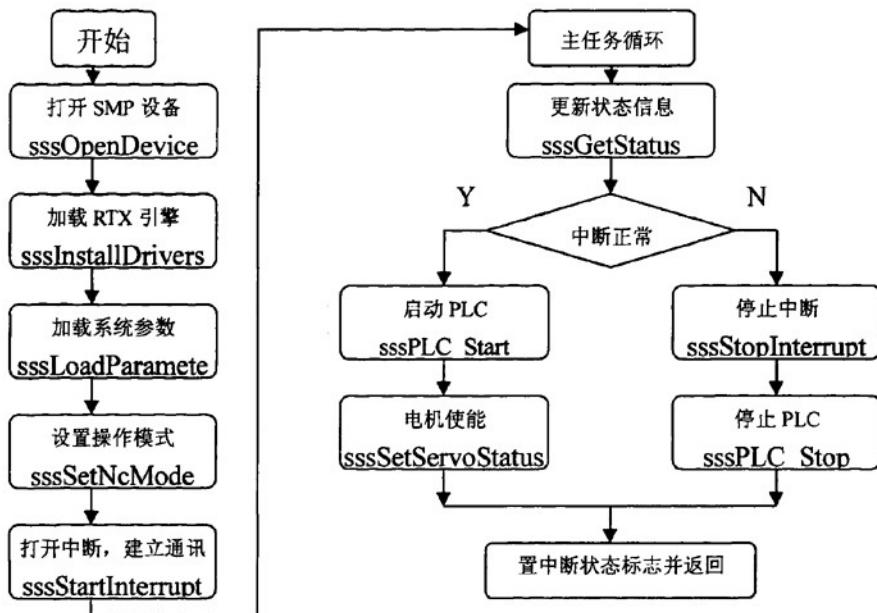


图 3-4 程序开发流程图

### 3.2.3 系统主界面

ServoWorks 引擎内核的初始化完成后，将进入系统的主界面。主界面的右边和下边各有十个快捷键，可在不同的模式和界面中设计为不同的功能，如图 3-5 所示。

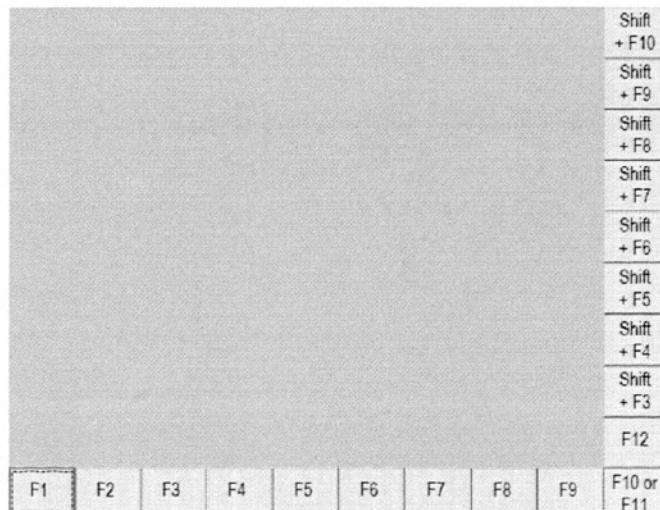


图 3-5 S100M 程序主界面快捷键图

系统的右侧功能键共有 7 个，分别是：“设置”、“屏幕显示”、“轴锁定”、“加工路径绘图”、“加工程序编辑”、“主轴控制”和“异警信息”。在功能子页面中，用户可以进行与界面相关的设置和相关功能的实现。系统的下方共有十个功能键，分别是系统的模式选择、参数设定和退出。

系统界面的左侧和中间部分则是各种信息的实时反馈显示，分别为轴位置显示、伺服状态显示、加工路径描图、主轴和加工信息等等。系统主界面如图 3-6 所示。



图 3-6 S100M 程序主界面图

### 3.2.4 系统模式的切换

S100M 中设置了 7 种操作模式，分别是位于主页面下方的 7 个功能按钮：“连续点动”、“增量点动”、“快移方式”、“MDI 方式”、“回零方式”、“手轮方式”和“自动方式”。主模式与子模式的切换如图 3-7 所示。

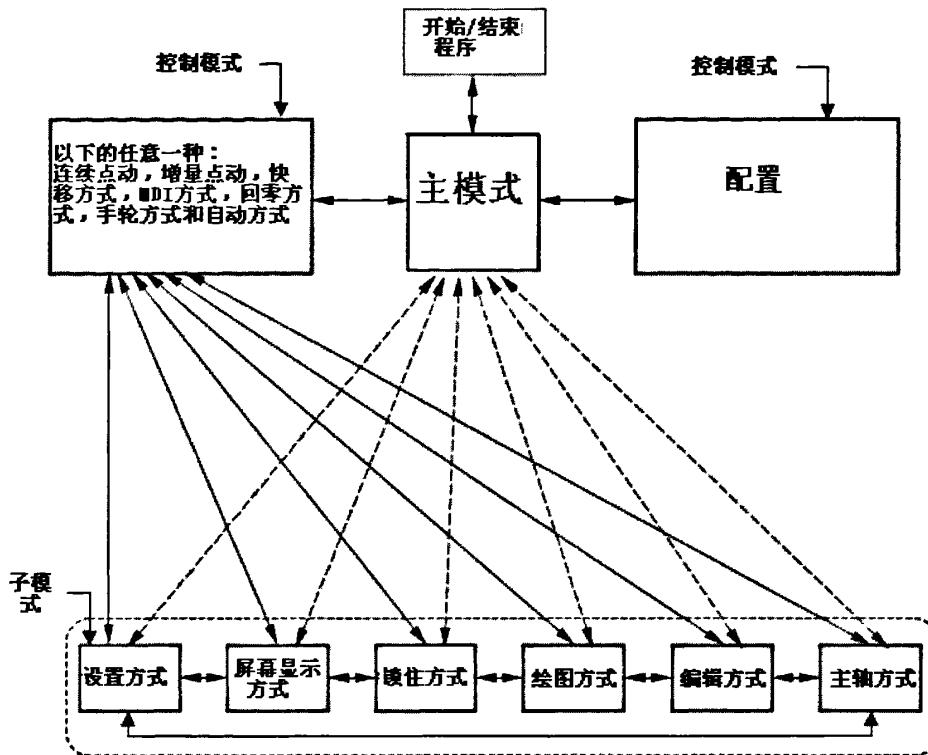


图 3-7 S100M 模式切换图

一般来说，传统加工中心数控系统并不将模式选择设置在主界面上，而是通过外接的操作面板的模式选择开关或者按键经过 PLC 对系统的指令来进行模式的切换。这样能够使操作界面更加简约，也方便操作人员的快速切换。然而，S100M 基于软件替代硬件的设计理念，尽可能的减少硬件的排布，也使其能够适应各种各样的数控化场合，开放性更强。然而，每次模式的切换都要经过主界面的过渡，使得操作过程尽管直观却稍显繁琐。

在主界面下点击“回零方式”按钮，将通过如下函数的调用来实现模式的切换，并且对每个可用轴的回零状态进行检测并显示。

```

Private Sub SetHomeMode()
    HMIMode = HMI_HOME          '设置回零模式
    HMISubMode = SUB_OTHERS      '设置回零模式下的子模式
    For i = 0 To 4
        If (SSSSTATUS.ServoOn(I2DMapIndex(i)) = 0) Then
            TOGGLEBTN_HOME(i).Caption = "Aixs " &

```

```

StrAxisNameLb(i) & " Disabled"           '轴不可用

Else

    If (SSSSTATUS.AtHomeFlag(i)) Then
        TOGGLEBTN_HOME(i).Caption = "Axis " &
        StrAxisNameLb(i) & " At Home"           '轴已回零

    Else

        TOGGLEBTN_HOME(i).Caption = "Axis " &
        StrAxisNameLb(i) & " Not At Home"       '轴未回零

    End If

End If

Next i

End Sub

```

设置了回零模式后，在回零界面中，如图 3-8 所示，下方的七个按钮将重新定义为回零的功能按钮，程序如下。

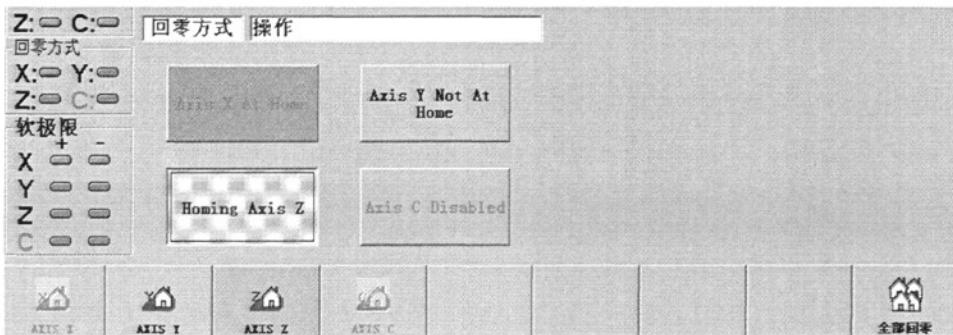


图 3-8 回零模式图

```

If (HMISubMode = SUB_OTHERS) Then
    Select Case HMIMode
        .....
    Case HMI_HOME      '回零界面
        If (SSSSTATUS.HomeState(I2DMapIndex(1)) <= HOME_DONE) Then
            If ((GetDriverType And SSSNC_BASICIO_MASK) =
            SSSNC_SSCNET Or MyMotorParam.encoderType(I2DMapIndex(1)) = 1) And

```

```

IsResetAtHomePosAbs = 1 Then
    TTTT = sssSaveAbsEncParameters(HDEVICE, vbNullString,
AXIS_02)           '绝对值情况下保存绝对值参数
    Else               '开始回零
        TTTT = sssHomeStart(HDEVICE, CLng(AXIS_02), 1)
    End If
    TTTT = SWCNC_Msg(TTTT)
    Else
        If (sssHomeStop(HDEVICE, CLng(AXIS_02)) <>
SWAPI_ERROR_SUCCESS) Then
            '回零不成功则错误处理
        End If
    End If
End Select
End If

```

### 3.2.5 实时状态信息显示

CNC 系统运行时，在程序主循环体中，通过调用 API 函数实时读取系统状态，更新程序对应的状态变量来实现信息的实时显示。

读取系统状态的 API 函数为：

```

Public Function sssGetStatus
    (ByVal hDev As Long, ByRef pStatus As SSS_STATUS) As Long
    sssGetStatus = sssIoControl(hDev, IOCTL_SSSNC_GET_STATUS,
    vbNull, 0, pStatus, Len(pStatus))
End Function

```

其中 `sssIoControl` 函数定义在 `SwDII.dll` 文件中，是对大部分系统状态的读取和系统参数的写入时和内核交互过程中要使用到的重要函数。

`sssGetStatus` 函数对一个非常重要的类型进行赋值，这个类型叫做 `SSS_STATUS`，如下面所示，它包含了几乎所有的系统参数和状态值。

```
Public Type SSS_STATUS
```

```
'=====运动和伺服参数、状态、标志值====='
```

```
ServoOn(MAX_ALLAXES - 1) As Integer
' 每个轴伺服使能状态

AlarmReset(MAX_ALLAXES - 1) As Integer
' 每个轴报警重置状态

EncoderValue(MAX_ALLAXES - 1) As Long
' 每个轴编码器数值

ActualPosition(MAX_ALLAXES - 1) As Double
' 机器坐标下的每个轴反馈坐标值

PositionCommand(MAX_ALLAXES - 1) As Double
' 机器坐标下的每个轴位置命令

ActualVelocity(MAX_ALLAXES - 1) As Double
' 每个轴的实际速度

HndlEncoderValue As Long
' 手轮编码器数值

ISRTIME As Double
' Interrupt Service Routine run time since start (Sec)

HndlPositionCounter As Double
' 手轮位置计数值

HndlData As HNDWL_DATA
' 手轮轴选号码和倍率

SmoothingMode As Integer
' 平滑处理模式选择: 线性、钟形、指数

MotionEngineState As Integer
' 实时运动引擎状态

GServerState As Integer
' G 代码编译器状态

PlcState As Integer
' PLC 引擎状态

CommunicationState As Integer
' 硬件通讯状态
```

```

'====CNC 参数、状态和标志值 ====='
MachinePos(MAX_ALLAXES - 1) As Double
    ' 每个轴的机械坐标值
ProgramPos(MAX_ALLAXES - 1) As Double
    ' 每个轴的工件坐标值
RelativePos(MAX_ALLAXES - 1) As Double
    ' 每个轴的相对位置数值
WorkCoordOffset(MAX_ALLAXES - 1) As Double
    ' 每个轴的工件坐标偏移值
NCMode As Byte
    ' NC 模式值
CncStatus As Integer
    ' NC 操作状态
InPositionCheckState As Integer
    ' 到位宽度检查
.....
'====伺服硬件平台参数、状态和标志值 ====='
.....

```

下面两行代码说明了机床位置信息和编程位置信息的状态变量和源数据获取函数。程序运行后如图 3-9 所示。

```

MachinePos(i) = DataConversionByUnit(SSSSTATUS.MachinePos(i))
ProgramPos(i) = DataConversionByUnit(SSSSTATUS.ProgramPos(i))

```

	机械位置	编程位置
X(mm):	0000.000	0000.000
Y(mm):	0000.000	0000.000
Z(mm):	0000.000	0000.000
C(deg):	0000.000	0000.000

图 3-9 位置信息图

通过对 `SSSSTATUS.DC120_Din(DCIndex - 1)` 和 `SSSSTATUS.ServoOn(i)` 的读取，可以显示机床 I/O 与伺服使能的状态，如图 3-10 所示。

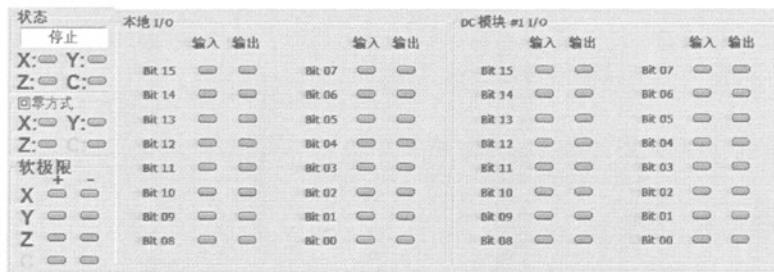


图 3-10 S100M 伺服机床状态显示模块图

S100M 用下面的 `DoPlot` 函数实现加工路径的显示，效果如图 3-11 所示。

```
Public Sub DoPlot()
    .....
    PlotArea.Line(.....), CurrentPlotColor
    .....
End Sub
```

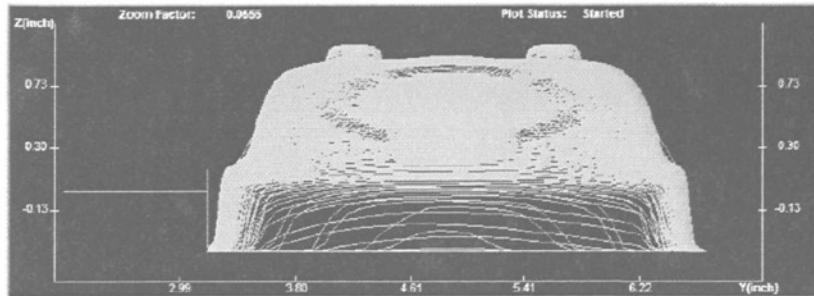


图 3-11 加工路径框图显示

对伺服状态的监测也是数控系统中非常重要的一部分。作为开放式的数控系统，其选配的通用型伺服和电机可以有非常多的选择，因此，在对伺服进行监测和参数设定等操作时，就难免会面临无法适用于所有伺服的情况。这时，开发者只能针对特定的伺服和电机，依据伺服厂家给予的接口和协议进行伺服的监控和参数的读写。安川通用型  $\Sigma$  系列 A C 伺服单元 S G D M 是应用非常广泛的一款产

品，通过用数字操作器连接用的和 CN3，连接电脑的串行通信端口，可以进行伺服单元的常数设定、伺服单元内部动作状态的监视和运转等操作。

COM 口的连接线如图 3-12 所示。

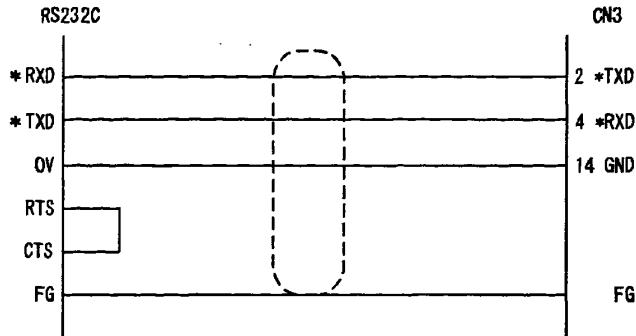


图 3-12 伺服与 PC COM 连接图

通信是从电脑发送指令根据伺服单元回应来进行。基本的指令/回应是 JIS 代码组成文字列 “W n c a a a a d d d d s s [C R]”，由 14 位文字构成。“W”是指令文字列的开始符号，在伺服单元内的接收缓冲中被复位。C 是指令代码，n 代表轴地址，a a a a 是参照的数据的地址，d d d d 是被参照的数据，s s 是检查和，[CR] 是指令/应答的终端符号。通信全部采用半双工通信方式，伺服单元在接收到信号后 200MS 以内开始发送应答。若超过 200MS 应答不能返回，则暂停一次，再次发送指令。

在数控系统伺服状态的显示界面中，程序将间隔一小段时间就向伺服发送一些参数和状态读取指令，并更新显示。COM 口初始化的程序如下所示，其中 SndTxt.Text 的值是读取伺服实时扭矩值的指令的 JIS 代码形式。

```

If Not SSSMSComm.PortOpen Then
    SSSMSComm.CommPort = 1
    SSSMSComm.Settings = "9600,e,7,1"
    SSSMSComm.PortOpen = True
End If
SndTxt.Text = "573030383030323030303037450D"      ' 读取伺服实时扭矩值的指令的 JIS 代码形式
SSSMSComm.Output = TorqueCodeArr

```

COM 口通讯事件的程序如下所示，其中，RecvTxt.Text = TorqueRtnStr 是伺服返回值，将显示在系统伺服监测界面中。

```
Private Sub SSSMSComm_Oncomm()
    '通讯事件发生
    Dim indata As Variant
    Dim bytInput() As Byte
    Dim intInputLen As Integer
    Dim i As Integer
    Select Case SSSMSComm.CommEvent
        Case comEvReceive          '...有接受事件发生
            '此处添加处理接收的代码
            SSSMSComm.InputMode = comInputModeBinary
            '二进制接收
            intInputLen = SSSMSComm.InBufferCount
            ReDim bytInput(intInputLen)
            bytInput = SSSMSComm.Input
            '接收开始
            For i = 0 To UBound(bytInput)
                If Len(Hex(bytInput(i))) = 1 Then
                    TorqueRtnStr = TorqueRtnStr & "0" &
                    Hex(bytInput(i))
                Else
                    TorqueRtnStr = TorqueRtnStr & Hex(bytInput(i))
                End If
            Next
            RecvTxt.Text = TorqueRtnStr
        End Select
        SSSMSComm.InBufferCount = 0
        SSSMSComm.OutBufferCount = 0
    End Sub
```

除了读取伺服电机的扭矩、速度、累计负载、指令脉冲速度、D B 电阻功耗、

报警状态、惯量比、马达类型、编码器类型等数据，还可以通过不同的指令值对伺服参数进行设定以及对伺服的运转模式进行更改。

### 3.2.6 系统参数读取和设置

系统参数通过 SERVO\_CONTROL\_PARAM、SERVO\_DRIVE\_PARAM、NC\_PARAM 等数据类型来保存这些参数值。SSS\_STATUS 类型保存的主要是系统当前的状态值，而这三个类型则保存系统的参数设定值。例如，NC\_PARAM 类型定义如下所示。

Public Type NC\_PARAM

PlusStroke(MAX_ALLAXES - 1) As Double	' 正限位
MinusStroke(MAX_ALLAXES - 1) As Double	' 负限位
Backlash(MAX_ALLAXES - 1) As Double	' 背隙
PitchOrigin(MAX_ALLAXES - 1) As Double	' 螺距补偿起点
PitchInterval(MAX_ALLAXES - 1) As Double	' 螺距补偿间距
RapidFeedrate(MAX_ALLAXES - 1) As Double	' 快移倍率
JogFeedrate(MAX_ALLAXES - 1) As Double	' 寸动倍率
HomeType(MAX_ALLAXES - 1) As Long	' 回零类型
HomeSwitchType(MAX_ALLAXES - 1) As Long	' 回零开关类型
HomeDirection(MAX_ALLAXES - 1) As Long	' 回零方向
HomePosition(MAX_ALLAXES - 1) As Double	' 零点位置
.....	

End Type

S100M 将所有的系统参数储存在 Windows 注册表中，如图 3-13 所示。系统通过以下两个函数实现参数的读取与保存：

```
sssLoadParameters(vbNullString,MyNcParam,MyMotorParam,MyServoParam)
sssSaveParameters(vbNullString,MyNcParam,MyMotorParam,MyServoParam)
```

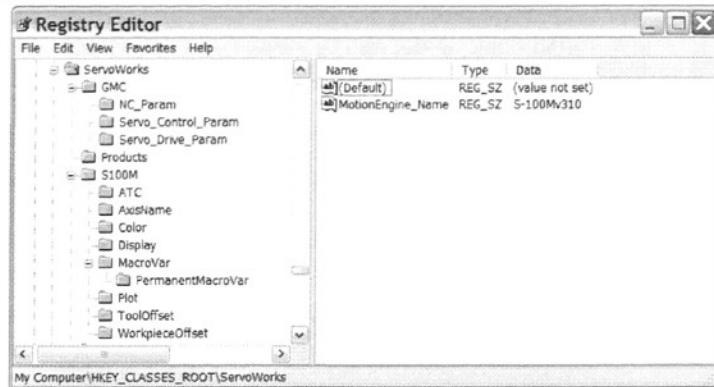


图 3-13 Windows 注册表中的 S100M 参数子键

系统参数可以通过对注册表的操作来实现备份和恢复。如下面程序所示，当系统在参数设置画面按下底部第一个按键，并且是以管理员身份登录时，执行 SaveSysPara 函数来进行参数的备份。

```

If HMIMode = HMI_SETUP And Param_SSTab.Tab = 0 And
IsParamPwdUser = False Then
    Dim MsgOk As Integer
    MsgBox("备份系统参数吗？", vbYesNo + vbInformation)
    If MsgOk = 6 Then
        SaveSysPara
    End If
End If

```

在下面的 SaveSysPara 函数中，首先判断备份文件夹是否创建，然后利用 ShellExecute 函数来执行注册表相应位置到 sheliSSS.reg 文件的备份。

```

Private Sub SaveSysPara()
    On Error GoTo ErrHandler
    Dim strParameters As String
    '判断备份文件夹是否存在，如果没有就创建
    Dim strFolder As String
    strFolder = "C:\Program Files\SoftServo\backup\
    If Dir(strFolder, vbDirectory) = "" Then
        MkDir strFolder

```

```
End If

Dim StrItem As String
'系统参数在注册表中的位置
StrItem = "HKEY_CLASSES_ROOT\ServoWorks"
Dim StrFileName As String
'命令字
StrFileName = strFolder & "shellSSS.reg"
strParameters = "/e "" & StrFileName & "" "" & StrItem & """
Dim RtMsg As Integer
'利用 ShellExecute 函数保存到一个文件
RtMsg = ShellExecute(0, "open", "regedit.exe", strParameters,
"c:\windows", 0)
If RtMsg = 0 Then GoTo ErrHandler
On Error GoTo ErrHandler
GoTo FuncDone

ErrorHandler:
BUF = "SaveSysPara"
MsgBox BUF, vbCritical, resString.Hmi_ManualStr(6)

FuncDone:
End Sub
```

当使用不同的命令字时，例如 `strParameters = "/s "" & StrFileName & "" ""` 时，同样可以利用 `ShellExecute` 函数将之前保存的文件中的参数恢复到注册表相应位置，达到参数恢复的目的。

### 3.3 数控系统硬件与加工中心电气连接

数控系统硬件与加工中心的 `VersioBus` 光纤数字网络类型电气连接，如图 3-14。系统通过 `FP-95` 卡集成所有的输入输出端口，通过光纤连接的 `DC` 模块连接通用型伺服，通过 `IM` 模块和板载端口连接外部 `IO`。

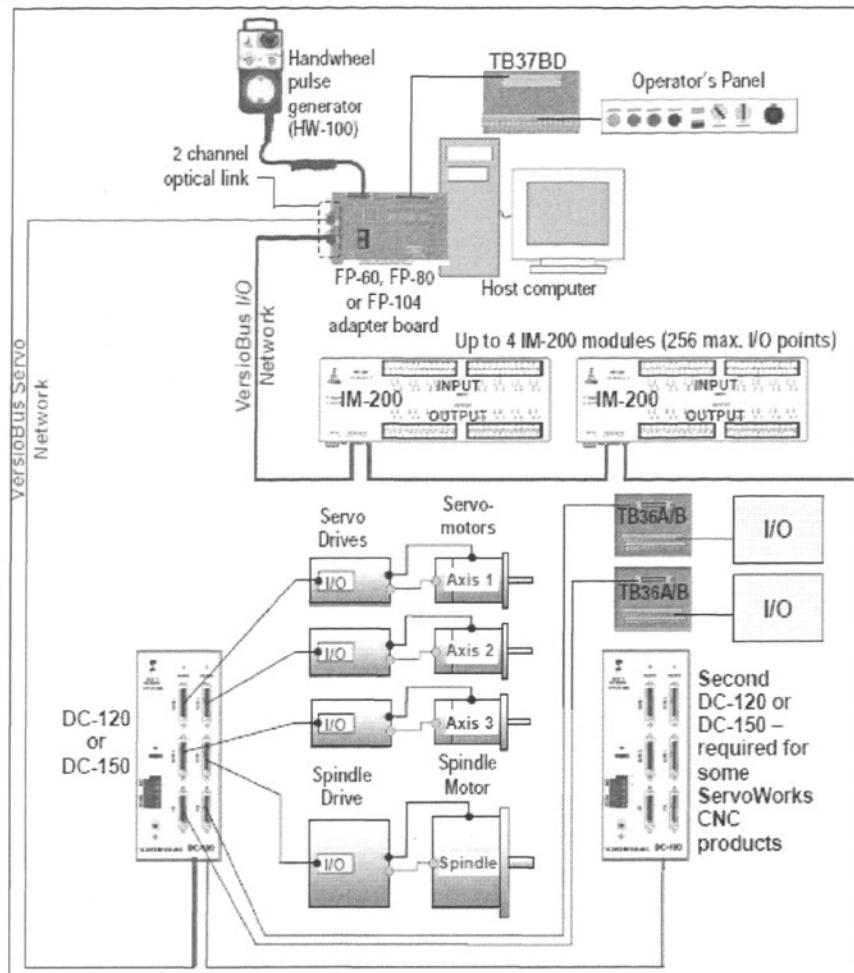


图 3-14 数控系统电气连接图

### 3.3.1 系统与伺服连接

每个 DC150 可以接四个轴，一般使用两个 DC150，可以同时接 5 个联动轴、1 个主轴和 2 个 PLC 轴。以安川Σ系列 A C 伺服单元 S G D M 为例，与 DC150 上的 AXIS 接口连接如图 3-15。其中，A\_OUT 和 AGND 为模拟电压输出正极和负极，ABZ 为编码器反馈信号，SVON 和 RST 与 GND 相对应，可以向伺服发出使能和重置命令。FAULT 和 GND 是伺服端反馈信号，由伺服端的/S-RDY+ 和/S-RDY- 发出，代表伺服已经准备完毕。

AXIS	PIN NO.	线色	PIN NO.	SERVO
A_OUT	18	黄红1	5	V_REF
AGND	36	黄黑1	6	SG
A <sup>+</sup>	16	紫红1	33	PA0
B <sup>+</sup>	15	紫红2	35	PB0
Z <sup>+</sup>	14	紫红3	19	PC0
A <sup>-</sup>	34	紫黑1	34	/PA0
B <sup>-</sup>	33	紫黑2	36	/PB0
Z <sup>-</sup>	32	紫黑3	20	/PC0
V_OUT	9	灰红5	47	+24-IN
SVON	26	灰黑1	40	/S-ON
RST	7	灰黑2	44	/ALM-RST
FAULT	4	灰黑4	29	/S-RDY+
GND	20	灰黑5	30	/S-RDY-

图 3-15 系统与伺服连接图

### 3.3.2 系统与 IO 连接

S100M 数控系统通过 IO 接口模块 IM400 与外部电气连接，IM400 是由厦门大学研发中心参与设计的新型 IO 接口模块。通过光纤连接 FP-95 板卡进行数据交换。IM400 使用四个 40PIN 的牛角接头，采用漏极方式连接外部输入输出，与三菱数控系统基本 IO 模块接口类似，可以方便的连接市场上应用广泛的外部硬件，例如操作面板、继电器模块、分线器等。开放式数控系统如果可以有广泛的兼容性与外部硬件进行连接，将很大程度上减少外部硬件研发费用，也可以照顾到用户的使用习惯。IM400 数字输入和输出内部电路如图 3-16。

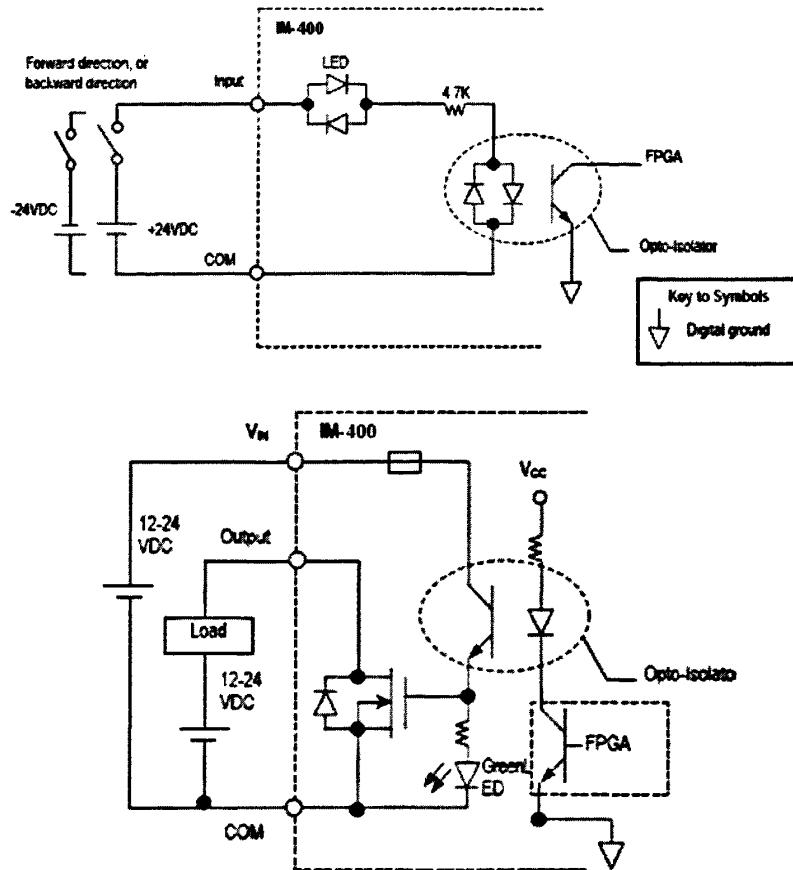


图 3-16 数字输入和输出内部电路图

### 3.4 LadderWorks PLC

#### 3.4.1 机床 PLC 概述

可编程逻辑控制器简称 PLC。机床上的 PLC 作为 CNC 的辅助部分，主要负责开关量的控制，完成一些与逻辑有关的动作控制，如刀库换刀、操作面板控制、切削液开关等等。现在流行的机床 PLC 一般都作为一个功能模块内置在 CNC 系统中，可与 CNC 之间进行内部的信号传输，是一种专用的 PLC。CNC、PLC 和机床的总体结构如图 3-16 所示。

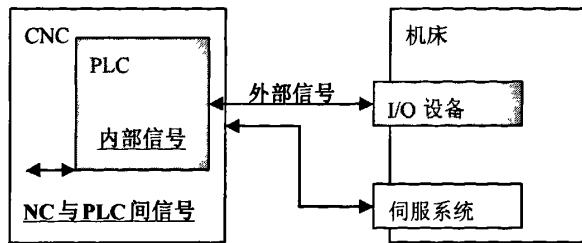


图 3-16 机床 PLC 信号流示意图

PLC 逻辑控制是协助 CNC 完成对数控机床运作控制的重要环节。一般来说，CNC 只负责控制伺服相关的运动，例如轴的运动量和运动精度，除此之外所有的机床运作由 PLC 控制，例如监控某个开关的状态、设置 CNC 的运行状态、控制机床动作与机床运动之间的配合等等。这样做好处是避免了 CNC 的运动核心花费太多的运行时间在每个 I/O 点上的扫描和逻辑处理，从而保证了伺服控制的高效性。

### 3.4.2 LadderWorks PLC 概述

LadderWorks 是基于 ServoWorks 技术的一种软件式内置 PLC 系统。LadderWorks PLC 系统包括 ServoWorks PLC 引擎内核、swPLC\_Link(ServoWorks PLC Link)系统服务和 LadderWorks 控制台组成<sup>[30]</sup>。swPLC\_Link 是运行在 Windows 中的一项服务，负责基于 ServoWorks 的 PLC 相关应用程序与基于 ServoWorks 的数控系统程序之间的链接。如图 3-17 所示。

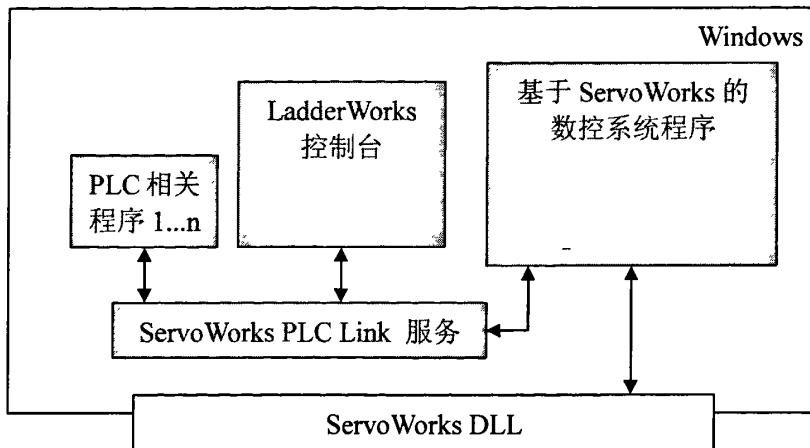


图 3-17 swPLC\_Link 服务功能示意图

LadderWorks 控制台是一个集 PLC 程序创建、编辑、编译、运行监控和调试功能于一体的 PLC 控制平台。

LadderWorks PLC 程序运行结果暂存在一个称之为“历史结果寄存器”的堆栈中，如图 3-18 所示。

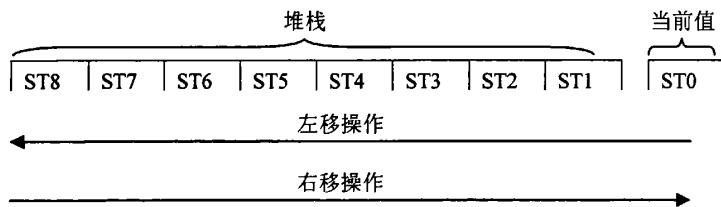


图 3-18 历史结果寄存器示意图

LadderWorks PLC 包括了 12 个基本指令和 38 个功能命令。基本指令是 PLC 编程时最经常用到的指令，包括读取、写入、与操作、非操作等等。功能命令，也叫做“功能模块”，是用于集中完成一系统功能方式的 PLC 编程指令。

LadderWorks 的 PLC 地址分为内部地址和外部地址。外部地址指的是 PLC 引擎与运动引擎或是机床 I/O 设备间的输入输出地址；内部地址是 PLC 引擎执行逻辑运算时，在内部使用的地址点。图 3-列出了 LadderWorks PLC 的地址信号流程<sup>[31]</sup>。

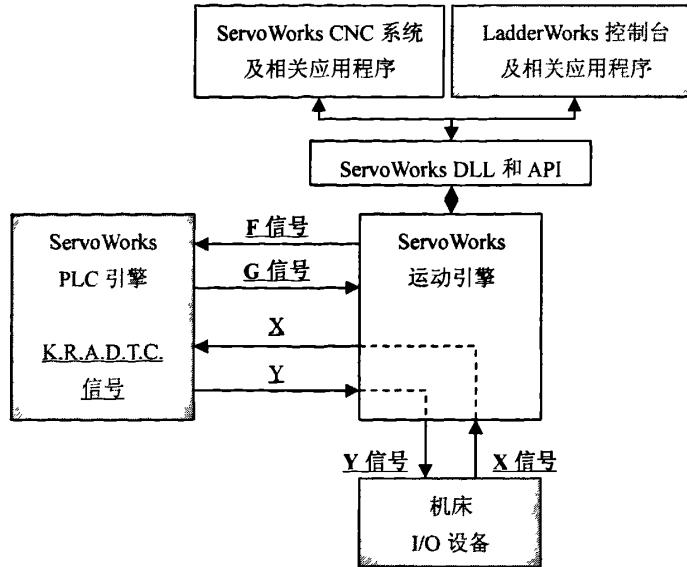


图 3-20 LadderWorks PLC 地址流示意图

**X** 地址是机床 I/O 设备上的输入开关。

**Y** 地址是机床 I/O 设备上的执行点。

**F** 地址是 ServoWorks 运动引擎的运行状态。它是 ServoWorks 系统的固定地址，用户不能自定义。例如，F1.0 表示 CNC 急停状态（该位为 1 时表示 CNC 正处于紧急停止状态。）

**G** 地址是 ServoWorks 运动引擎运行状态设置地址。**G** 地址也是 ServoWorks 系统的固定地址，用户不能自定义。例如，G8.4 为 CNC 急停状态设置。（该位为 1 时 CNC 进入紧急停止状态。）

**A** 地址是报警地址，用于临时存放报警状态。当一个 **A** 地址被激发，ServoWorks 运动引擎会激活对应的程序响应。由于 **A** 地址状态值是存储在内存中的，所以每次程序重启，所有的 **A** 地址都会被重置。

**R** 地址是内部临时地址，用于临时存放一些状态。由于 **R** 地址状态值是存储在内存中的，所以每次程序重启，所有的 **R** 地址都会被重置。

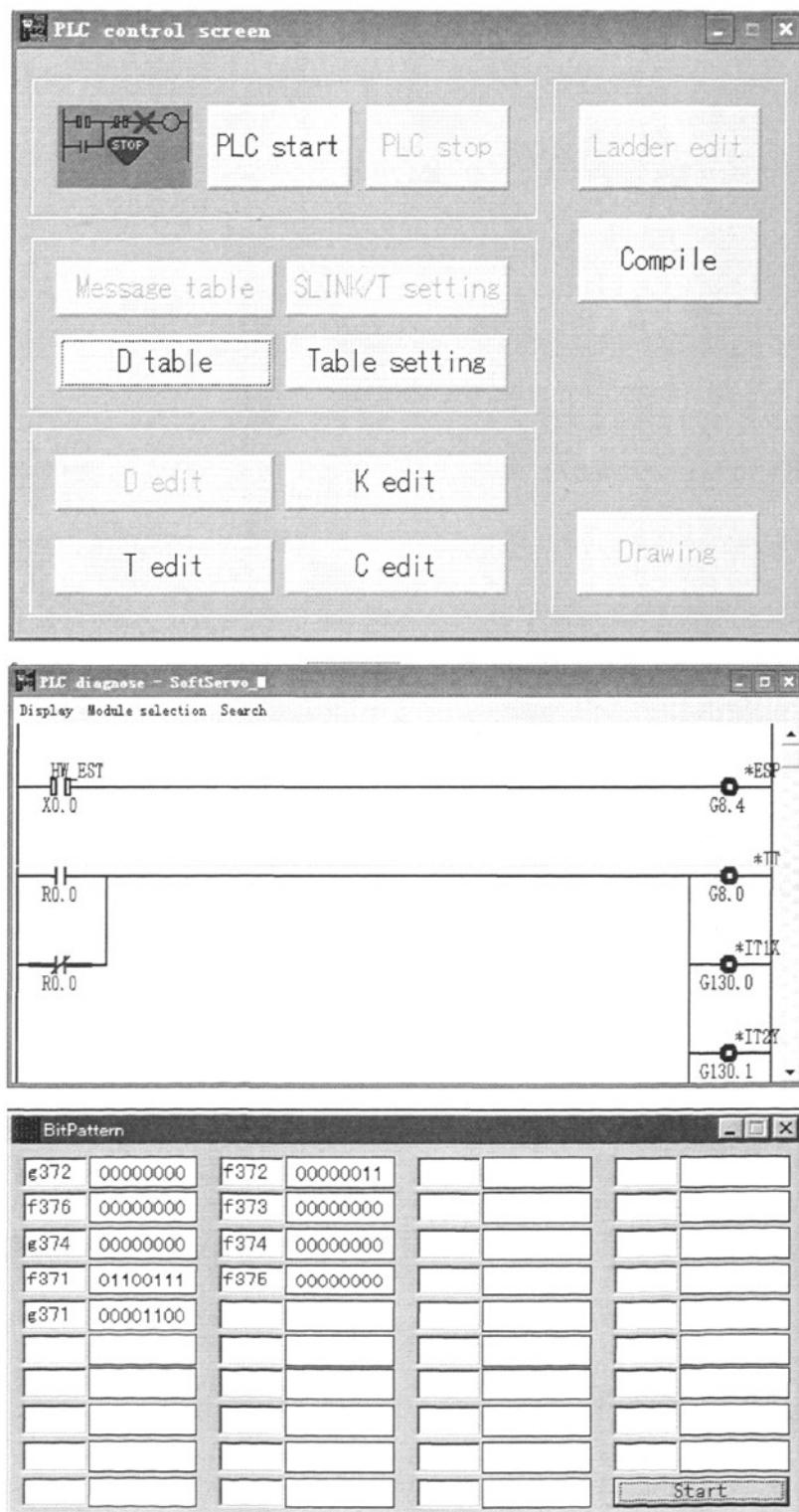
**K** 地址是状态寄存地址点。由于 **K** 地址的状态值会被用参数的形式保存下来，所以每次开机，系统会根据保存的参数设置 **K** 地址。

**D** 地址是数据寄存表。一般以字节、字、双字为单位进行操作，其状态值以参数形式保存。

**C** 地址和 **T** 地址分别为计数器设定值和计时器设定值，其状态值以参数形式

保存。

ServoWorks PLC 程序可以使用四个外置程序进行编译、查看梯形图、查看位值和查看波形。如图 3-21 所示。



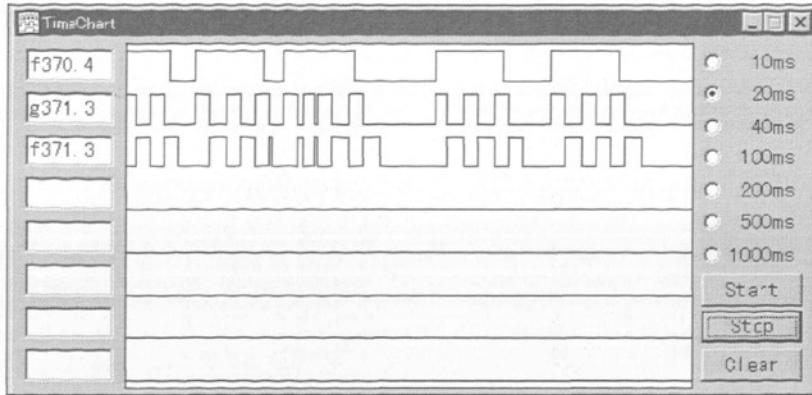


图 3-21 LadderWorks PLC 外置程序

### 3.4.3 机床 PLC 的组成

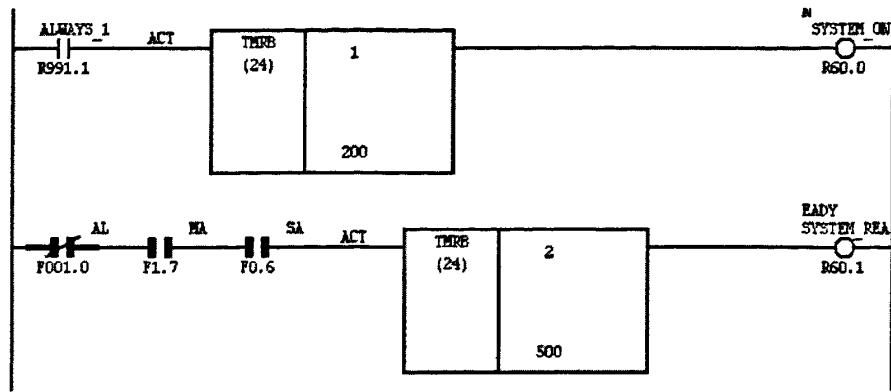
加工中心首先是一台数控机床，所以 PLC 程序包括了通用数控机床的 PLC 功能模块。总体来说，加工中心 PLC 分为系统运行基本 PLC、机床运行基本 PLC、其他辅助机构 PLC、操作面板 PLC 及刀库 PLC 这五大部分。

#### 3.4.3.1 系统基本 PLC 部分

系统基本 PLC 部分用于保证 CNC 系统和 PLC 系统的正常工作状态和对警报的处理。主要有以下几个功能模块：

- 急停处理—由急停按钮引发的急停处理。
- 系统准备—系统通电开机、就绪状态宣告。
- 报警—处理各种来自系统内部、伺服系统、机床机构警报
- 指示灯—监视机床运行状态并以各个指示灯输出信息。
- 程序运行相关的 M 功能—实现诸如 M00, M01, M02, M30, M98, M99 等与程序运行相关的 M 码基本和扩展功能。

如下面系统准备 PLC 程序所示，系统开机后延时一段时间将 SYSTEM\_ON 设为 1，但是要等到 F1.7 (MA, 系统准备好) 和 F0.6 (SA, 伺服准备好) 的系统状态为 1 后延时一段时间才将 SYSTEM\_READY 设为 1。

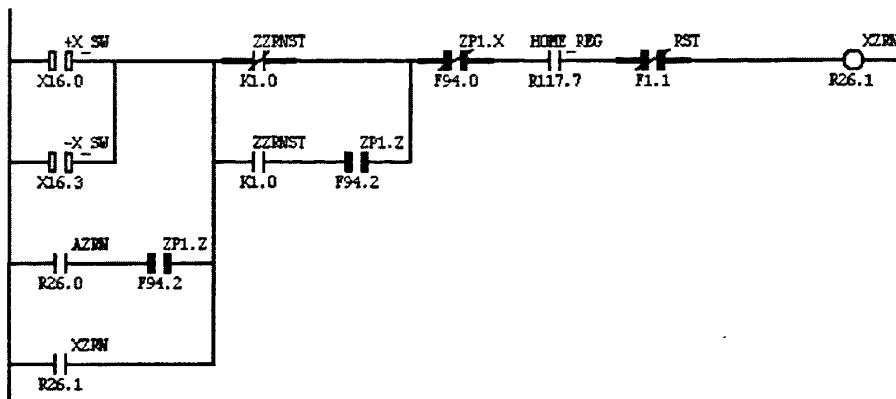


### 3.4.3.2 机床基本 PLC 部分

机床基本 PLC 部分用于完成机床在正式运行程序前或者程序运行中的一些准备动作和安全保证动作的执行。主要有以下几个功能模块：

- 所有轴的回零操作一半自动或全自动进行所有轴的回零操作。
- 导轨润滑及主轴冷却一定时进行导轨润滑油压注动作；监视主轴转速，高于设置值时启动主轴油冷装置。
- 主轴功能实现—主轴相关的 M 码、S 码处理和动作要求（M03 正转、M04 反转、M05 停止、M19 定位等）实现。
- 机床用压缩气路管理—对压缩气路进行监控，保证压力值稳定和低压警报。

如下 X 轴回零 PLC 程序所示，在回零状态下，X+或 X-按钮均可执行回零动作，直到接收到 F4.0（X 轴回零完成）的系统状态为 1 时才结束回零。



### 3.4.3.3 其他辅助机构 PLC 部分

其他辅助机构 PLC 部分实现加工中心常规配备的辅助机构功能动作，有以下功能模块组成：

- 通用 M 功能—M07 空气吹屑功能、M08 切削液功能等
- 排屑机控制功能
- 手轮功能—实现手轮轴对机床的控制。

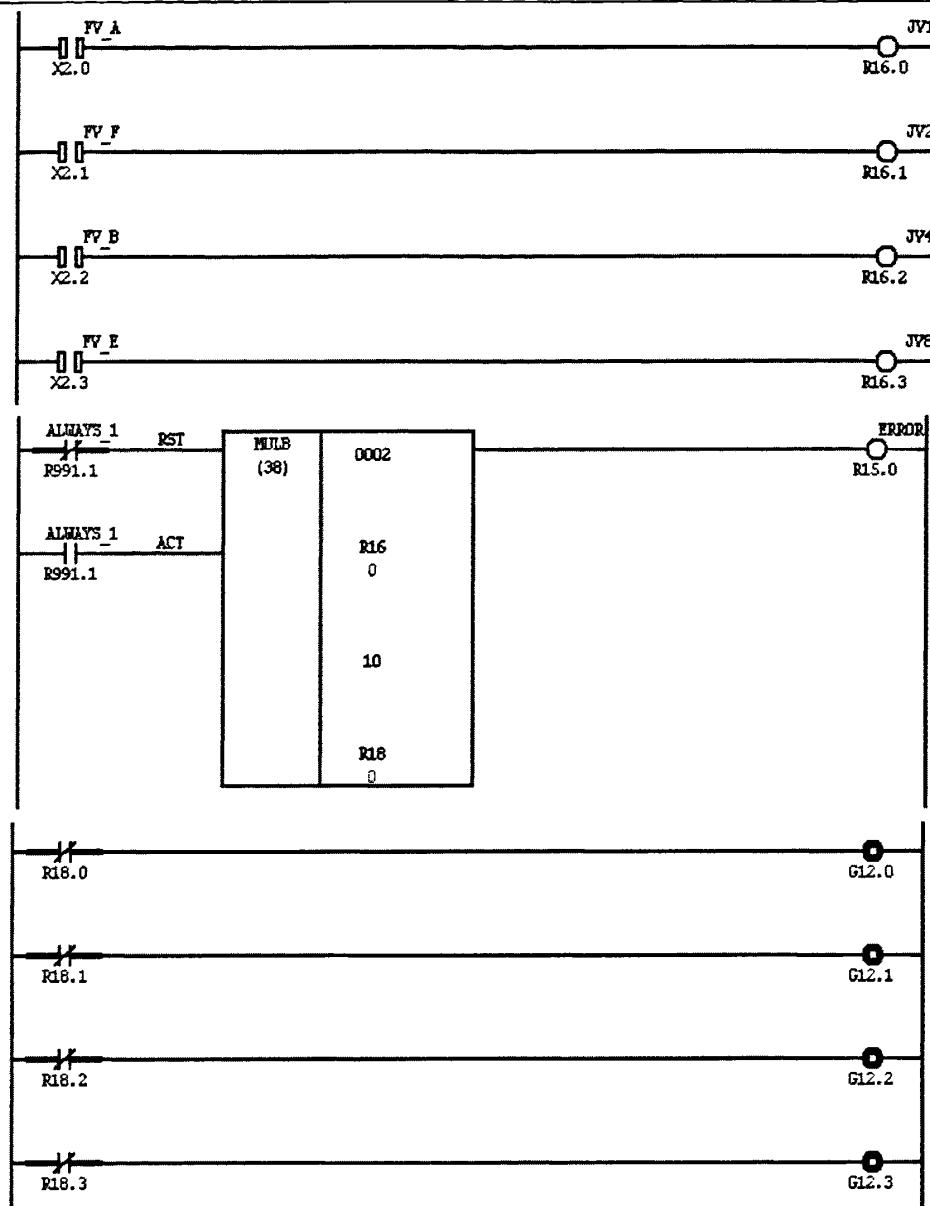
### 3.4.3.4 矩阵式锁码面板 PLC

一般来说，数控系统的操作面板分为两种，一种称为直连面板，及点对点式的面板，面板的按键、拨码开关和 LED 指示灯等输入输出与系统的 PLC 的 IO 点一一对应，直观且易于维护，价格低廉。另一种称为矩阵式锁码面板，它的特点是应用类似 PC 机键盘的 IO 原理，将输入或输出点以矩阵式排列，通过内置电路和 PLC 程序进行译码和解码。这种面板虽然价格偏高，但是能够节省系统端 IO 点数，在一定程度上节省系统硬件成本，也使得系统 IO 连接和配线更加简约。此外，矩阵式的面板由于采用更复杂的电路，往往同时具有锁机和解锁的功能。

无论是那一种面板，其内在功能都可概括为以下几种：

- 操作模式选择
- 各种速率选择—进给速率、快速倍率和主轴倍率
- 轴动按钮—X、Y、Z 和第 4 轴的正反方向移动。
- 程序运行相关的辅助功能实现—程序开始、循环暂停、机床锁定、切削液开关、工作灯开关等等。
- 按钮 LED 指示
- 系统状态和主轴、等待刀号 LED 指示

以直连面板的快移倍率的拨码开关 PLC 为例，程序如下所示。程序将 X2.0-X2.3（快移拨码开关的四个输入点）写给系统内部存储器 R16 暂存，然后将 R16 乘以 10 写给 R18，最后将 R18 的值通过 G12 写给系统端执行。



矩阵式面板独有的 I/O 处理，其原理如图 3-22 所示。

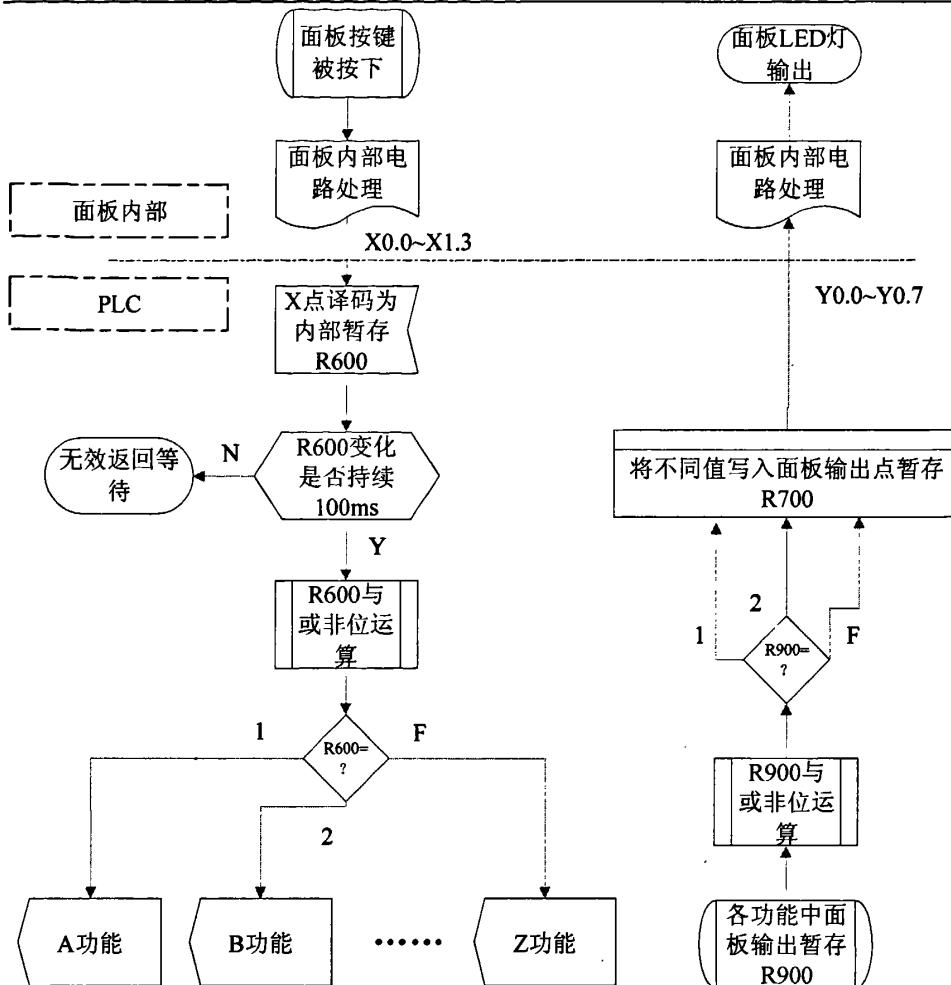


图 3-22 矩阵面板 IO 处理流程图

### 3.4.3.5 刀臂式刀库 PLC

刀臂式刀库也称为机械手刀库，最大的特点是换刀迅速，可靠。它主要是靠凸轮机构完成换刀动作的，这种方式简单、可靠，平时只要注意按时更换凸轮箱里的油，换刀机构就能具有较长的使用寿命。特别适用于大批量的生产。

刀臂式刀库换刀是随机地址换刀，系统中有一张刀具表，它有两栏，一栏是刀套号，一栏是对应刀套号的当前程序刀号，**T** 指令的刀号表示的是程序刀号，而不是刀套号。系统要记忆这个刀表，即使重新上电，刀库也不需要回零。换刀时 **PLC** 根据程序刀号查询刀表，在刀表中找到对应于程序刀号的刀套号，换刀完成后 **PLC** 自动更新刀表。

刀臂式刀库需搭配自动换刀机构 ATC(Auto Tools Change)进行刀具交换。自动换刀机构主要是将加工所需刀具，从刀库中传送到主轴夹持机构上，同时将主轴上的刀具传送到刀库中保存。刀臂式刀库换刀流程如图 3-23。

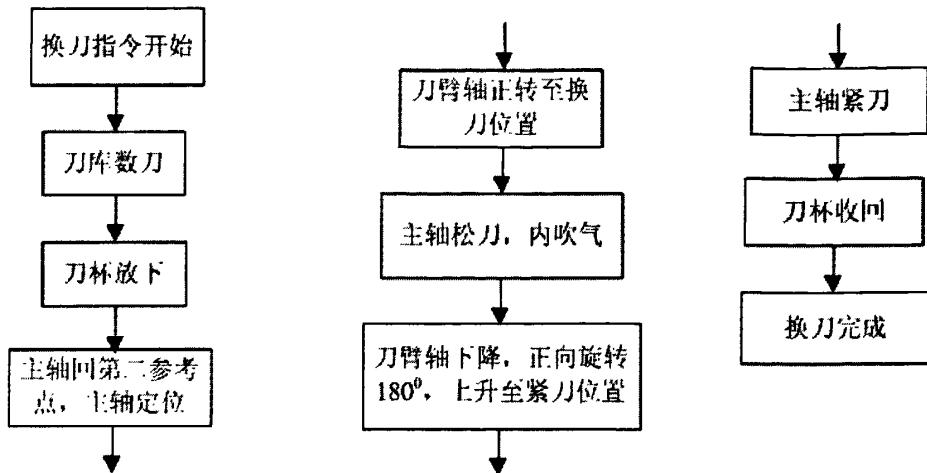


图 3-23 刀臂式刀库换刀流程图

刀库换刀时，通过 M6 调用下面的宏程序来将伺服或系统动作和 PLC 或者外部电气之间联接起来，一起完成换刀的成套动作。

```

G40G80 ; 刀具半径补偿取消，固定循环取消
#510=#4001 ; 暂存移动指令 G00, G01, G02, G03, G32, G90, G92, G94
#511=#4003 ; 暂存平面选择指令 G17, G18, G19
#512=#4120 ; T 代码
#513=#1032 AND 255 ; PLC 的输入值 G55, G54, 即主轴刀号
#514=BIN[#513] ; 主轴刀号从 BCD 码转换为 BIN 格式
(IF[#512 EQ #514] GOTO N1000) ; 如果主轴刀号和 T 代码一致，直接结束宏程序
  
```

N1G91G30Z0 ; Z 轴回到第二参考点，准备换刀

M19 ; 主轴定位

M6 ; 开始 PLC 程序中的换刀译码

G#510G#511 ; 换刀完成后恢复暂存移动指令和暂存平面选择指令

N1000M99 ; 宏程序结束，返回主程序

刀臂式刀库 IO 点分配如表 3-1 所示：

表 3-1 刀臂式刀库 IO 地址点分配表

地址点	Signal Name	地址名称
X17.0	ARMBRK	刀臂传感器 123
X17.1	ARMCLM	刀臂传感器 124
X17.2	ARMORI	刀臂传感器 125
X17.3	POTUPLS	刀库数刀
X17.4	POTDNLS	刀杯上限位
X17.5	MGR_CNT	刀杯下限位
X17.6	MAGCW	刀库正转按钮
X17.7	MAGCCW	刀库反转按钮
X3.2	CLAMP	夹刀限位
X3.3	UNCLAMP	松刀限位
X3.4	UNCBTN	松刀按钮
Y24.0	ATCCW	刀臂正转
Y24.1	ATCCCW	刀臂反转
Y24.2	MGCW	刀库正转
Y24.3	MGCCW	刀库反转
Y24.4	POTUP	刀杯上
Y24.5	POTDN	刀杯下
Y24.6	TUNC	松刀
D20		主轴刀号
D21~D60		刀杯 1~40 刀号

刀臂式刀库的 PLC 程序大致上可分为刀号初始化、T 程序刀号译码、刀库数刀、机械动作（刀库转动、刀臂转动、刀杯上下、主轴松夹刀）、刀号交换、辅助 M 功能等等。

辅助代码 M86 执行时，刀号初始化流程由图 3-24 所示。

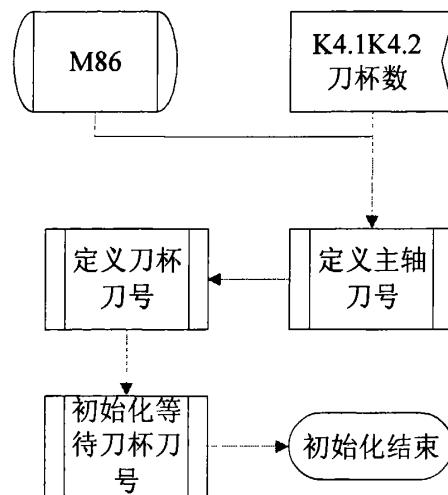


图 3-24 “主轴正转”模块工作流程简图

换刀指令 M6 和 T 码执行时，整个换刀 PLC 程序流程如图 3-25 所示。

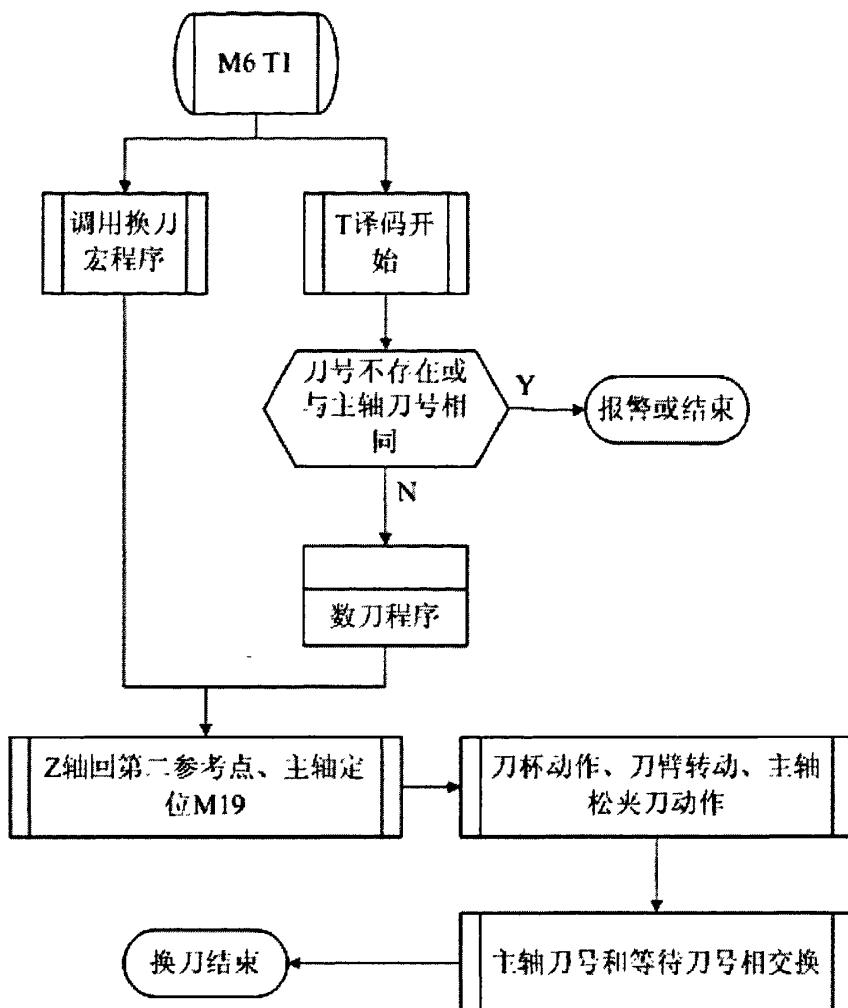
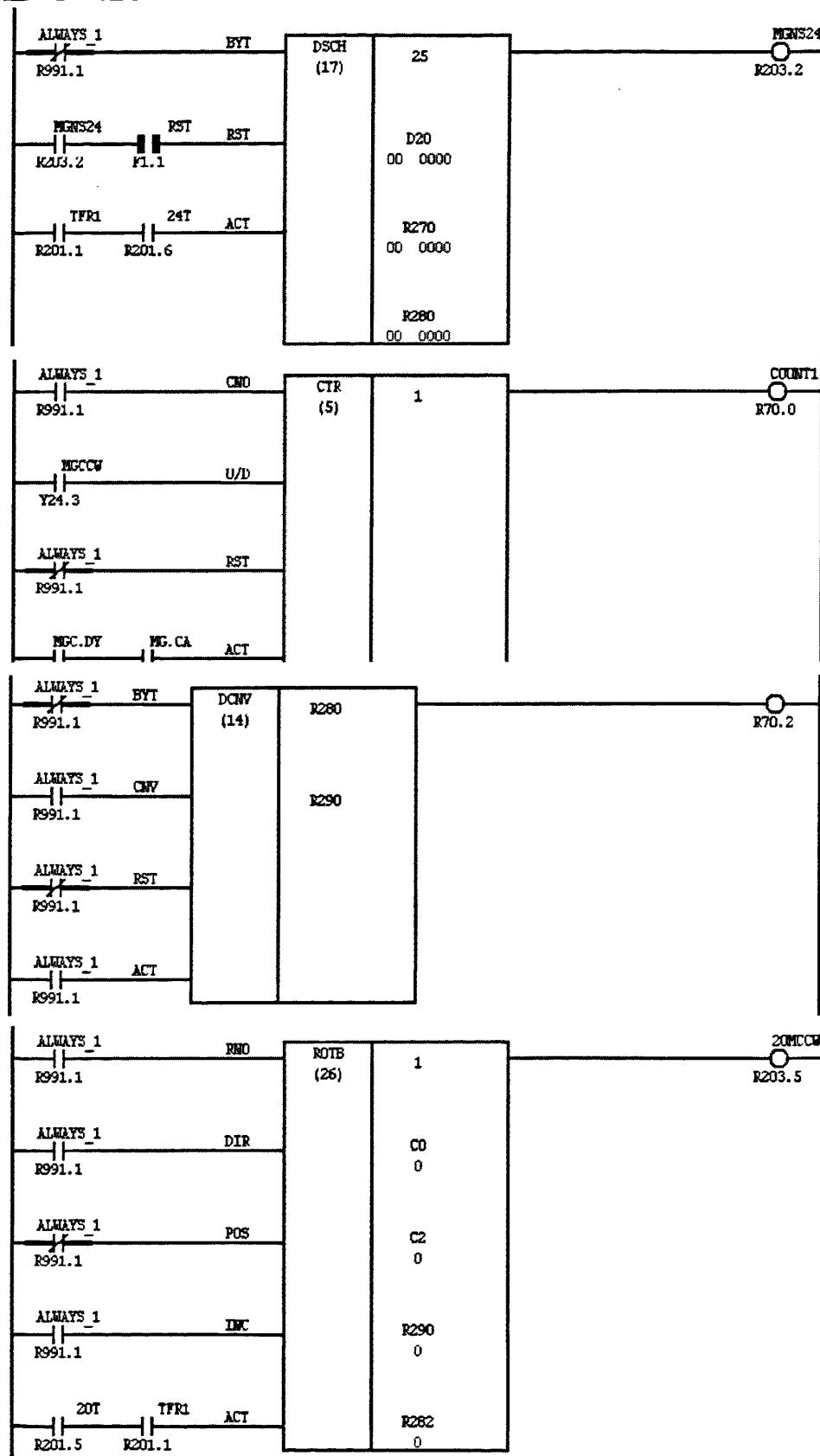


图 3-25 换刀 PLC 程序流程图

其中，以数刀 PLC 程序为例，主要部分如下所示，通过 DSCH 函数找到 T 译码后的刀号所在的刀杯位置，DCNV 函数将 T 译码后的刀号转换成 BCD 格式，ROTB 函数判断和比较当前刀杯号与目标刀杯号，决定刀盘向哪个方向转动，CTR 函数的作用是接收到数刀点的信号之后加 1，得出的计数值提供给 ROTB 函数做下一步的计算。刀库换刀 PLC 的源程序见附录。



### 3.5 本章小结

本章在第二章的理论研究指导下, 对三轴立式加工中心采用 ServoWorks 技术编写了开放式数控系统 S100M 和配套的整机 PLC 程序。S100M 在 VB6.0 的环境下编写, 不但实现了基本的数控系统功能, 还能在用户需求或者特殊情况下进行功能的扩展。同时, 使用标准的 PLC 编程语言进行整机 PLC 程序的编写, 能与市场上流行的操作面板、刀库相匹配。

## 第四章 基于 ServoWorks CNC 技术的立式加工中心整机调试

### 4.1 整机调试概述

一般来说，数控系统和电气部分安装调试工程可以分为工程进度安排表、机械检查、主轴动平衡、配电盘电路调试、整机电路调试、伺服控制调试、加工调试等几个步骤，如图 4-1 所示。通过相关规范的制定和实际工程中的不断修改和完善，开放式数控系统也能从高开放式、兼容性的实验室产品逐步走向成熟，更加贴近用户的使用需求和实现高稳定性、专用性。从高开放式、兼容性再回到高稳定性、专用性，正是开放式数控系统孵化成熟，走向市场化的一个重要历程。本文的 S100M 是专门应用于多轴加工中心的数控系统，它的高开放式、兼容性使得在选用硬件平台、伺服和外部 IO 时灵活多变，力求达到传统数控所无法企及的快速反应和高灵活性，通过对当今最新的硬件技术的直接利用实现很高的性价比。同时，通过相关规范的制定和修改，能使整机的工程更加趋向于标准化和稳定。

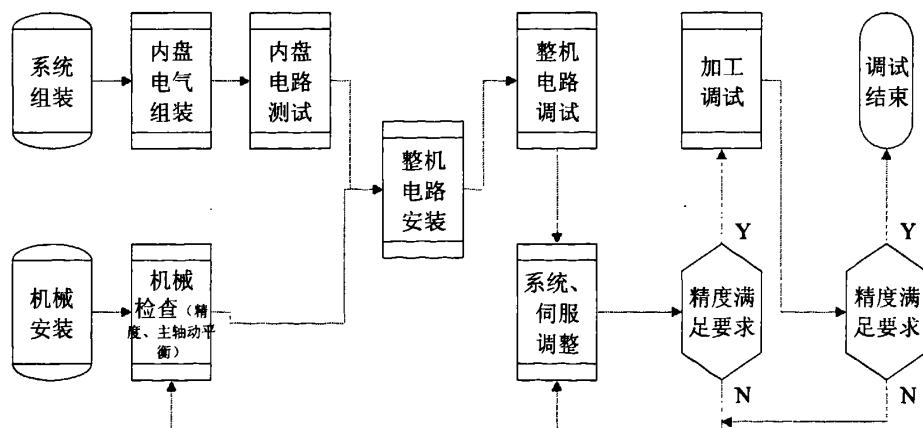


图 4-1 整机调试流程图

## 4.2 电气调试

加工中心电气部分调试可以大致上分为如下几个部分。

<b>1</b>	电压检查: 拔下驱动器和 NC、IO 板、操作面板输入电源, 通电检查 变压器输入输出电压□ 主电路端子电压□ 开关电源输入输出电压□
<b>2</b>	操作面板检查: 接好各电源输入, 检查功能: 电源开□ 电源关□ 是否报警□ 急停□ 面板输入功能□ 面板指示灯□
<b>3</b>	硬限位安装: 保证三轴行程□
<b>4</b>	绝对编码器设置:
<b>5</b>	外设检查: 各轴限位手动 IO 诊断□ 各轴零点手动 IO 诊断□ 三色灯□ 空调□ 注油器□ 冷却液泵□ 除屑机□ 主轴油冷机□ 工作灯□ 其它_____□
<b>6</b>	系统检查: 软极限是否合适□ 栅格是否标准□ 主轴定位□ 主轴转速反馈正确□
<b>7</b>	刀库设定: 机械角度□ 手动转刀臂□ 主轴定位角度□ Z 轴第二参考点□ 自动整刀 M86□ 按钮松夹刀□ M83/M84 刀杯上下□ 刀库正反转正确□ M6 换刀□
<b>8</b>	机械检查: 伺服监测正常□ 轴无异响□ BOLLBAR□ 镭射补偿□ 背隙补偿□ (G0 背隙补偿): X____ Y____ Z____ A____ (G1 背隙补偿): X____ Y____ Z____ A____
<b>9</b>	PLC 参数设定:

其中, PLC 参数设定主要涉及到 DKCT 四种寄存器, 断电时它们都不会被擦除, D 是 PLC 中定义的地址, 用来保存刀杯中刀号。K 寄存器相当于 PLC 开关, 可用于 PLC 调试或者 NO/NC 型开关的选择。C 是 PLC 中使用的计数器, T 为自定义的定时器, 如润滑油注油时间等。

当设定为 PLC 参数后, 可以使用 M86 对刀库刀杯进行初始化。然后用辅助 M 代码进行刀库动作的调试。

M77: 主轴内吹气

M80: 刀库手动

M83: 刀杯下

M84: 刀杯上

M86: 刀具初始化

M87: 松刀

M88: 夹刀

M89: 刀臂手动解除

M90: 刀臂手动宣告 1

**M91：刀臂手动宣告**

调试完刀杯和主轴松刀基本动作后，可以进行换刀分解动作调试。M80 可以分步执行换刀动作，而执行 M90 后，可以通过 X+ 和 X- 进行手动刀臂正反向旋转。

### 4.3 基本参数设定

系统的基本参数设定画面如图 4-所示。

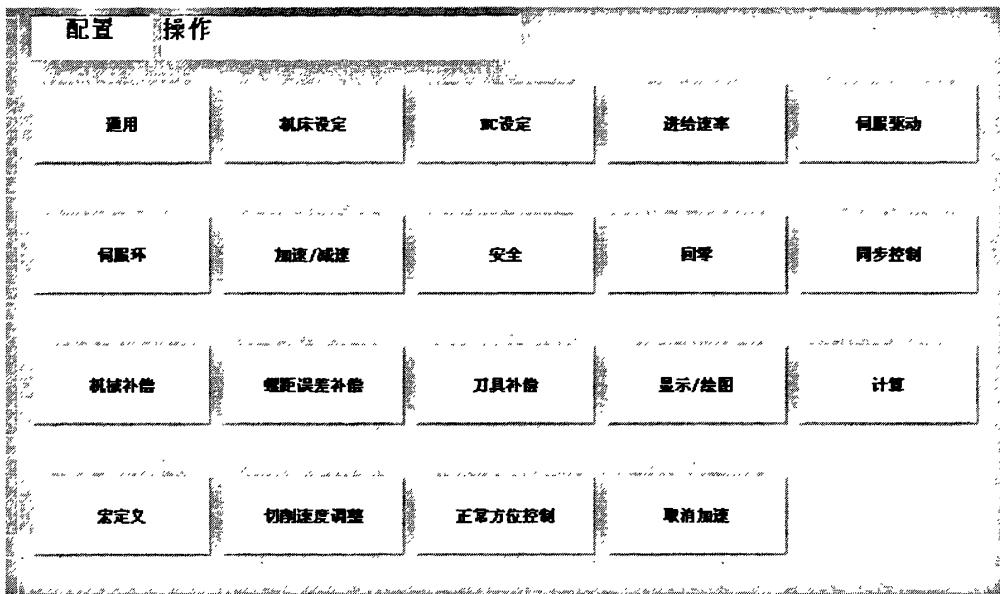


图 4-2 系统的基本参数设定图

在基本参数设定中，可按系统、电机、机械、加工四部分来设定一些关键参数值。

- 系统参数：参数设定口令、系统硬件数量（IM、手轮）、宏定义；
- 电机参数：轴类型、额定速度、峰值速度、编码器分辨率、编码器极性、编码器类型、伺服驱动速度敏感度、电机极性；
- 机械参数：螺距、到位宽度、过位置误差极限、进给率、硬限位及软极限、回零参数、背隙补偿、螺距误差补偿、刀具补偿；
- 加工参数：伺服控制参数（位置环）、加减速时间和过渡模式、转角减速参数、圆误差补偿、高速高精参数。

## 4.4 伺服控制调整

### 4.4.1 伺服控制概论

随着数控技术的日益发展,对加工精度和速度响应的要求越来越高。而伺服系统的性能是影响加工精度的一个极其重要的因素,除去考虑伺服本身的性能优劣以外,对 CNC 发出的指令是否能快速响应,是否能适应不同的机械特性,是否能在追求性能的同时也能保证伺服控制的安定性,都是需要考虑的问题。整个控制部分由三个反馈环构成(位置环、速度环、电流环),越是内侧的环,越需要提高其响应性。如果不遵守该原则,则会产生响应性变差或产生震动。由于电流环中确保了充分的响应性,因此只需调整位置环增益及速度环增益即可。

系统到伺服的控制如图 4-3 所示,位置环控制部分主要由系统端提供,并输出模拟电压<sup>[32]</sup>。

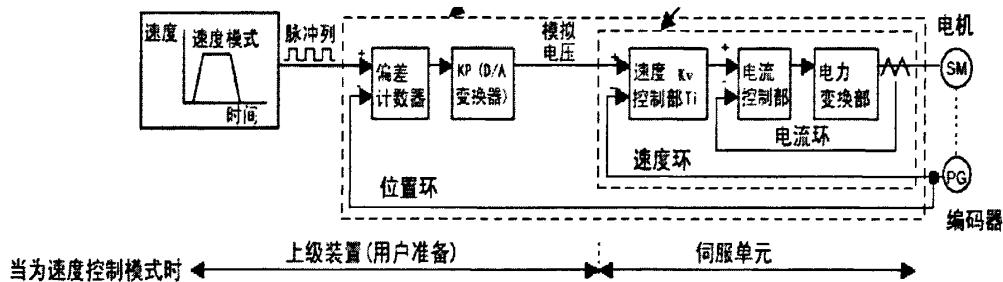


图 4-3 系统伺服控制图

### 4.4.2 伺服参数调整

一般来说,伺服参数的调整涉及到系统端位置环参数和伺服端速度环参数。速度环的响应性应高于位置环的响应性。因此,当提高位置环增益时,首先需提高速度环增益。如果只提高位置环增益,会引起速度指令震动,反而延长定位时间。

在伺服端的调整中,最重要的几个参数为<sup>[32]</sup>:

#### 1. 惯量比(Pn103)

$$\text{惯性比} = \frac{\text{电机轴换算的负载惯性动量 (J_L)}}{\text{伺服电机的旋转惯性动量 (J_M)}} \times 100 (\%)$$

## 2. 速度环增益(Pn100)

为决定速度环响应性的用户常数。在机械系统不出现震动的范围内，设定的常数越大，响应性越好。而且，当正确设定惯性比(Pn103)的值时，速度环增益与 Pn100 的值相等。

## 3. 速度环积分时间常数(Pn101)

为使对微小的输入也能响应，速度环中含有积分因素。由于该积分因素对于伺服系来说为迟延因素，因此时间常数过大时，会延长定位时间，使响应性变差。当负载惯性动量较大，机械系统内含有震动因素时，如果不在某种程度上增大积分时间常数，机械则会出现震动。

## 4. 扭矩指令滤波器时间常数(Pn401)

当使用滚珠丝杠等时，会发生扭转震动，震动音变高。此时，增大扭矩指令滤波器的时间常数，可消除震动。但该滤波器也与积分时间常数一样，对于伺服系统来说为迟延因素。

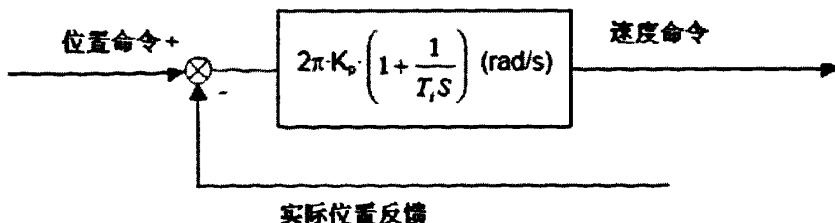
控制系统端的重要参数为：

### 1. 位置环增益 (Kp)

伺服系统的响应性取决于位置环增益。位置环增益的设定越高，则响应性越高，定位时间越短。位置环增益设定的高低取决于机械的刚性和固有震动频率。

另外，为提高响应性，如果仅提高位置环增益，作为伺服系统整体的响应，容易产生震动(位置环输出的某些速度指令产生震动)，所以应该一边注意响应性，一边提高速度环增益。

位置环比例-积分控制



## 2. 位置环积分时间常数 (Ti)

这个参数决定位置环积分控制的响应性。值越小，响应越快，但是也越容易产生振动。

## 3. 速度前馈百分比

速度前馈即计算出轴移动的方向上即将到达的某点处的速度的近似值，并且与期望速度值相比较，来产生影响轴的实际速度的因子。

$$\text{速度前馈} = \frac{\text{位置命令}[n] - \text{位置命令}[n-1]}{\text{位置采样时间}} * K$$

其中，n 是位置环采样计数器；K 是速度前馈百分比。

伺服调整方法为：

1. 先较低地设定上级装置的位置环增益，在不发生异常声音和震动的范围内，增大速度环增益(Pn100)。

2. 减小速度环增益值，使其小于上述 1 的值，在不发生超程和震动的范围内，增大上级装置的位置环增益。

3. 请在注意定位调整时间、机械系统震动情况的同时，决定速度环积分时间常数(Pn101)。过大时 会引起定位调整时间变长。

4. 当机械系统没有发生轴扭转震动时，将扭矩指令滤波器(Pn401) 设小。

当机械系统发出较高地震动声时，可能是发生了轴扭转震动，请将扭矩指令滤波器时间常数的值(Pn401) 增大，以减小震动声。

5. 最后，请进行阶梯响应等，对增益(位置、速度环)、积分时间常数等进行微调，以找出最佳位置。

利用安川伺服的 SigmaWin+ professional Σ-II 软件的 Real Time Trace，可以实时的追踪轴往复运动时的扭矩反馈和定位误差，进而可以得知伺服控制的响应性和精度。

针对伺服参数选择如表 4-1 所示几组参数值，按照伺服调整的方法进行实时追踪，就可以得到不同的伺服响应性和精度。如图 4-4 至图 4-7 所示，显示的是调整前和调整后的扭矩反馈对比以及指令速度和反馈速度的对比。

表 4-1 伺服参数选择值

	描述	Pn100	Pn101	Pn102	Pn401	Pn111	Pn103
1	初始参数	40	1592	40	100	100	70

<b>2</b>	增加刚性	60	1061	60	100	100	70
<b>3</b>	响应提高	85	749	85	100	100	70
<b>4</b>	机床响应性提高, 振动变大	120	530	120	100	100	70
<b>5</b>	丝杆异响, 响应性和精度变差	160	398	160	100	100	70
<b>6</b>	丝杆振动减小, 但仍可能异响	160	398	160	180	100	70
<b>7</b>	丝杆振动加剧	160	398	160	280	100	70
<b>8</b>	振动无法减弱	120	530	120	180	100	70
<b>9</b>	振动有一定的减弱	85	749	85	140	100	70
<b>10</b>	无变化	85	749	85	140	90	70
<b>11</b>	振动加大	120	530	120	140	90	70
<b>12</b>	有一点超程出现	80	796	80	140	90	98
<b>13</b>	参数调整 10%	75	849	75	140	90	98

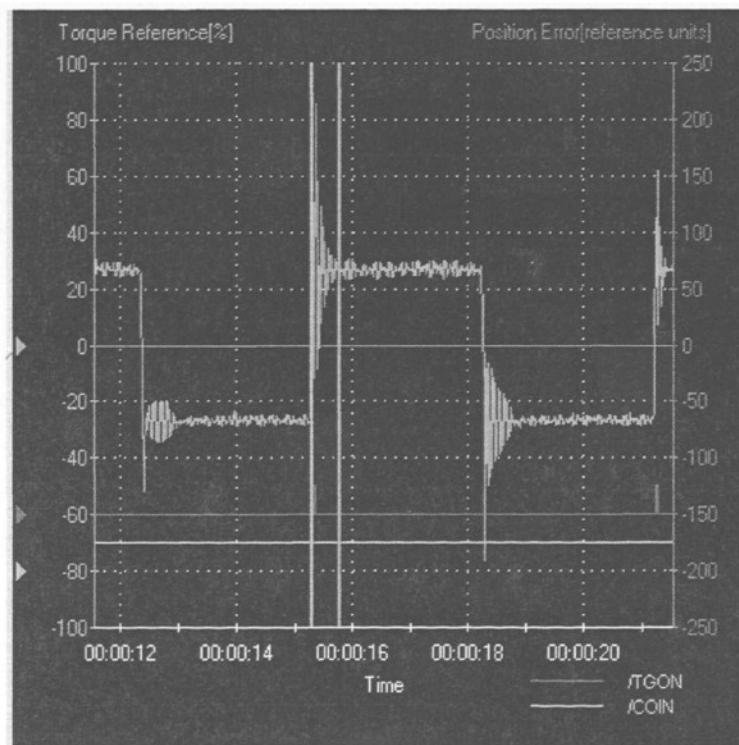


图 4-4 伺服调整前扭矩和位置误差

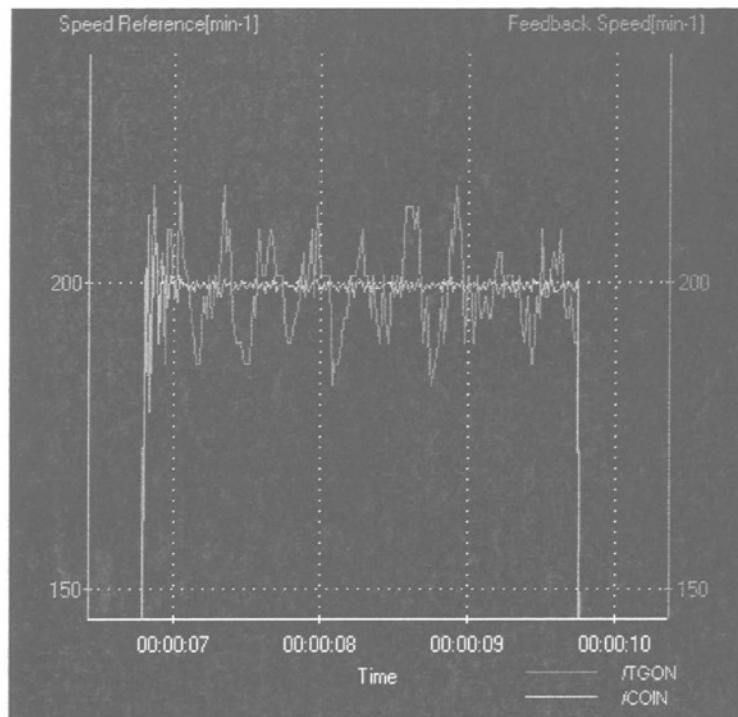


图 4-5 伺服调整前指令速度和反馈速度

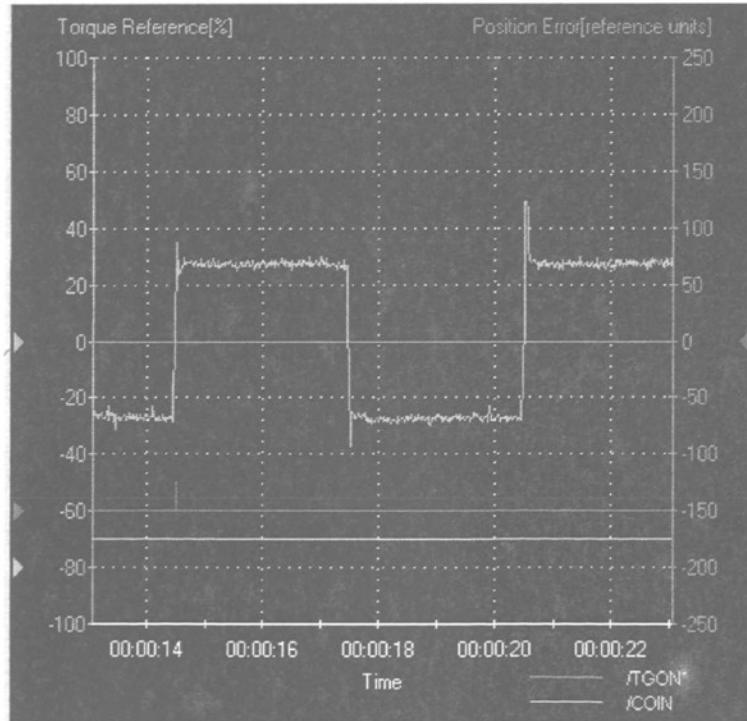


图 4-6 伺服调整后扭矩和位置误差

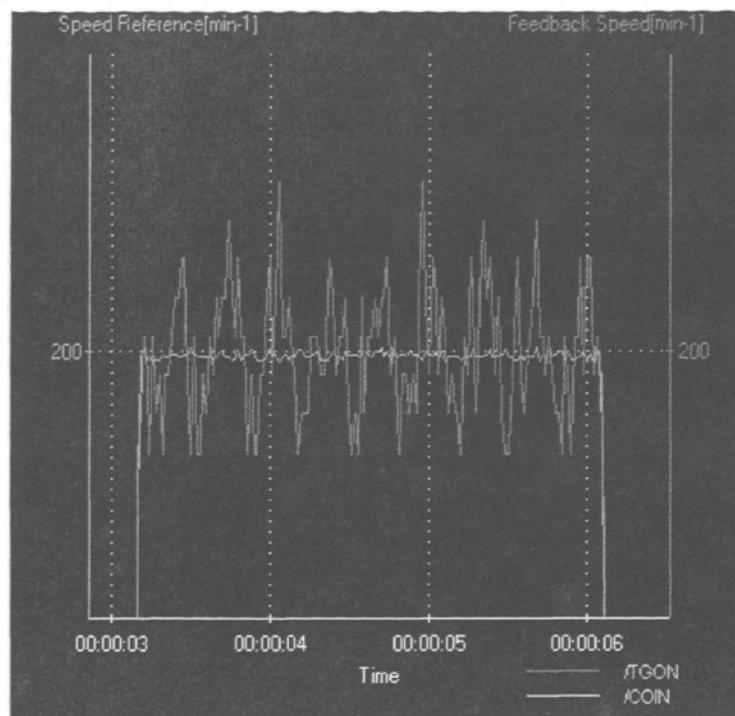


图 4-7 伺服调整后指令速度和反馈速度

#### 4.4.3 高速高精调整

随着市场竞争的加剧，制造业对高速高精加工技术的要求越来越高。

ServoWorks CNC 技术中的 3D-DLACC (3D-Dynamic Look-Ahead Contour Control, 三维动态前瞻轮廓控制技术) 利用 PC 机强大的运算能力显著地提高了数控系统的高速高精加工能力。

三维动态前瞻轮廓控制技术 (3D-DLACC) 专门为高速高精加工而设计。如图 4-8 所示，这项技术能够显著地提高系统的控制精度，提高实际加工路径与程序目标路径的吻合度，同时能够大大提高系统的整体加工速度。

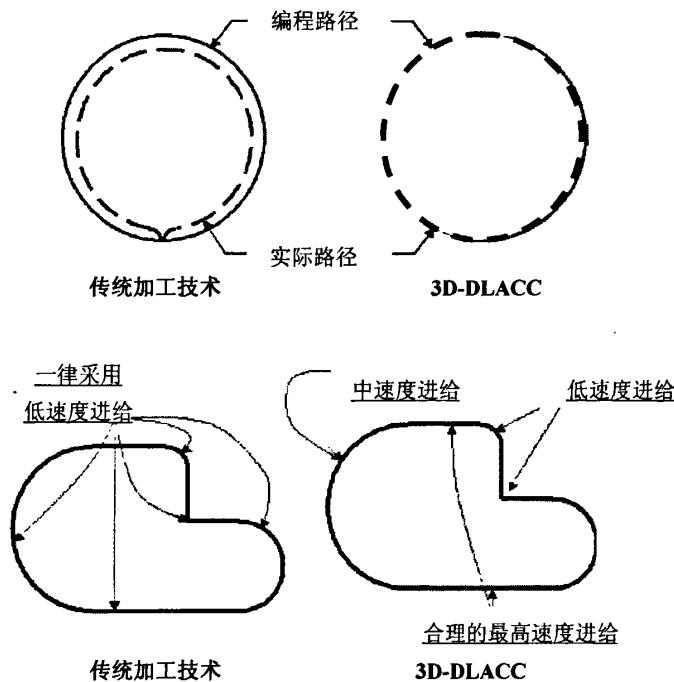


图 4-8 ServoWorks 三维动态前瞻轮廓控制技术

在运动控制领域，精度和速度一直以来都是相互制约的两个方面。为了尽量地提高加工精度，编程时不得不把复杂轮廓细化为十分密集的点，然后用直线插补的方式来直线逼近实际轮廓；然而细分的直线段越小，供机械进行加/减速的路径也就越短，在一定的时间内，速度自然就高不了。

传统的数控系统在进行具有复杂轮廓的零件加工时，强硬地整合这近似矛盾的两方面：由于预读的加工程序段不多，系统只能在相邻的两个线段之间进行插补后的加/减速处理。这种解决方案在进给方向变化不大的情况下，不会有什么不良的影响，但是遇到了加工方向急剧转变的情况，巨大的加/减速不可避免地造成了过切或少切，形成了轮廓误差；进而，巨大的加/减速又产生了巨大的冲击力，造成机床的非正常震动，甚至超过机床的结构刚性。

3D-DLACC 技术很好地解决了这个问题。它利用强大的 PC 软硬件资源，预读大量加工程序段，经过大量的数据运算分析加工路径，提前发现路径方向突变，然后进行前加减速处理，全局安排每一段加工路径上能够使得整体加工速度达到最高，而且在预分析长度里可以平滑实现的加/减速起始点和最高加/减速，如此很好地兼顾了精度与速度的达成。

与 3D-DLACC 有关的参数有：

1. 最大加速度

单位 meters/sec<sup>2</sup>，它是动态前瞻轮廓控制中的最大加速度，即最大加工速率的度量值。

2. 前瞻平滑时间

也叫平滑滤波时间常量，用来在精度和平滑度/进给率中找到一个平衡。值越小，精度越高，最大进给率越低。

3D-DLACC 的使用通过 G08 P1 和 G08 P0 来分别打开和关闭高速高精加工控制。如下程序中是使用 3D-DLACC 的一个例子。

```
G90G00X0Y0 'XY 轴回零
G08 P1      '打开 3D-DLACC
G91G01F20000.0 '直线插补和进给率
X50.0Y100.0
X60.0Y-100.0
X70.0Y100.0
X80.0Y-100.0
G08 P0      '关闭 3D-DLACC
G04 X1.0 '等待 1s
G90G00X0.0Y0.0 'XY 轴回零
M02      '程序结束
```

这段程序从 XY 平面的零点开始，打开 3D-DLACC，执行了一个锯齿状态的轴移动，然后关闭 3D-DLACC，最终在一段等待时间后返回零点。在对实际路径的观测中，发现 3D-DLACC 能够在保持很高的进给率同时很好的控制拐点的精度。

在实际的加工过程中，通过对 3D-DLACC 的两个控制参数最大加速度和前瞻平滑时间的经验值设定，一般都能找到高速加工和高精度之间的一个满意平衡。

## 4.5 本章小结

经过工程进度规范的制定, S100M 开放式控制系统进一步走向了成熟的应用阶段。从机械、电气到伺服的调试对整机精度的保证起到了良好的保证。在实际加工过程中, 高速高精经验值的加入使得产品的加工在速度和精度之间找到了一个平衡点, 从而令整机的性能得到了很大的提高。

## 第五章 总结与展望

### 5.1 总结

数控化是装备制造业的发展方向。开放式的数控系统是数控设备的前沿趋势和各国家、CNC制造商们的下一代研发产品的目标。而纯软件的数控系统以最为开放的态度成为了最有可能成为开放式数控标准的开拓者。

本文的 S100M 纯软件开放式数控系统经过系统核心提供商、研究机构、制造工厂等多方多年合作和投入，终于在三轴立式加工中心上得到了实质性的应用，也为今后在五轴联动机床上的应用打下了坚实的基础。

经过研究团队几年来对世界一流的开放式数控技术的研究和探讨，开放性的理念深入人心，其相对于传统数控的黑匣子技术的优势和潜力不言而喻。

ServoWorks CNC 的开放式架构和核心组成成为了我们了解和学习世界先进技术的窗口和平台。基于此技术的 S100M 数控系统不仅作为一种实践性的创新应用，而且将开放式系统与传统系统推上了面对面竞争的舞台。

S100M 数控系统可以实现传统数控的功能，兼容其外围硬件，也可以针对用户需求快速开发功能，人机界面也可以通过使用者的反馈不断更新和更加人性化，同时，加工精度也能达到和超过传统数控系统的水准。然而，在整机的稳定性和可靠性上，传统数控系统却略胜一筹，S100M 离成熟应用还有一段很长的路要走。

### 5.2 展望

由于时间的关系和作者的水平有限，虽然 S100M 开放式数控系统得到了实质性的应用，但是仍然有许多的功能等待完善，本课题可进一步开展以下后续研究工作：

1. S100M 的人机界面和系统功能继续完善和扩展。
2. 开展五轴联动数控系统的研究与开发。
3. 开展数控系统智能化的研究，例如使用 STEP-NC 模型来替代 G 代码编译，以保留更多的制造信息和特征。
4. 开展数控系统网络化的研究。例如远程诊断、网络主从式系统架构等。

## 参考文献

- [1] 陈蔚芳, 王宏涛等. 机床数控技术及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] 蔡燕琴. 数控系统的发展方向 [J]. 机械制造与自动化, 2006, (35): 9—10.
- [3] 王隆太. 先进制造技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [4] 王立平, 吴军. 数控机床发展趋势及新技术刍议 [J]. 航空制造技术, 2008, (17): 50—51.
- [5] 张建生, 赵燕伟等. 数控系统应用及开发 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [6] 张志义. 数控应用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [7] 牛小方. 浅谈数控机床的发展趋势 [J]. 中国科技信息, 2007, (20): 68.
- [8] 杨占玺, 韩秋实. 智能数控系统发展现状及其关键技术 [J]. 制造技术与机床, 2008, (12): 63—66.
- [9] 林旺东. 浅谈开放式数控系统的研究 [J]. 职业, 2008, (2): 107—108.
- [10] 朱显明, 马洪波. 开放式数控系统浅析 [J]. 硅谷, 2009, (2): 123—124.
- [11] 谈峰. 主流开放式数控系统体系结构比较分析 [J]. 机械设计与制造, 2008, (3): 169—170.
- [12] 孙志永, 赵砚江. 数控与电控技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [13] 汪木兰. 数控原理及系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [14] 卢胜利, 王睿鹏, 祝玲. 现代数控系统—原理、构成与实例 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [15] 陈宗雨, 郭伟, 王立峰, 李从心. 基于 Windows NT 与实时扩展的开放式数控系统的研究 [J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(4), 568—572.
- [16] Soft Servo Systems, Inc. ServoWorks CNC Setup and Integration Manual for the VersioBus Interface System [Z], 2006.
- [17] 周凯. PC 数控原理、系统及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [18] 张成新. 基于 WindowsXP 的三坐标数控系统的研究 [D]. 山东理工大学, 2006.
- [19] 文怀兴. 数控铣床设计 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [20] 银斌. 基于 Windows 的数控钻铣床实时控制研究 [D]. 新疆大学, 2006.
- [21] Ardence, Inc. RTX DataSheet [Z], 2006.

- [22] Soft Servo Systems, Inc. Part Programming Manual for ServoWorks [Z], 2006.
- [23] Soft Servo Systems, Inc. LadderWorks PLC Reference Manual [Z], 2006.
- [24] Soft Servo Systems, Inc. ServoWorks CNC Setup and Integration Manual for the VersioBus Interface System [Z], 2006.
- [25] Soft Servo System, Inc. ServoWorks CNC Setup and Integration Manual for the MECHATROLINK Interface System [Z], 2006.
- [26] 陈清德. 纯软件开放式 CNC 技术的研究及应用开发[D]. 厦门大学, 2007.
- [27] Tutorial. Introduction to EtherCAT [Z].  
<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/7299>, 2008-10-03.
- [28] 范真, 杨兴华, 袁锋. 加工中心[M]. 北京: 化学化工出版社, 2006.
- [29] 王为, 胡春林, 朱若燕. 基于四轴 CNC 机床的球头立铣刀端刃重磨方案 [J]. 工具技术. 2003, (07). 40-42.
- [30] Soft Servo Systems, Inc. LadderWorks PLC User's Manual [Z], 2006.
- [31] Soft Servo Systems, Inc. LadderWorks PLC I/O Mapping [Z], 2006.
- [32] YASKAWA, Inc. YASKAWA Σ-II 系列 SGMH/SGDM 用户手册[Z], 2005.
- [33] Soft Servo Systems, Inc. Reference Manual for ServoWorks CNC Parameters and Functions [Z], 2006.

## 致谢

首先要感谢我的导师陈永明老师，三年里，陈老师严谨的治学态度，勤奋的工作作风，以及为人处世的方式都深深的影响着我们整个团队。在学习和实际工作中，陈老师给了我关键性的指导；在生活上，陈老师给予我如父亲般的关怀和照顾。在作课题的过程中，陈老师给了我方向性的指导和鼓励，使我顺利的完成论文。

感谢整个实验室团队的兄弟姐妹在工作和学习上给我的支持和帮助。

感谢我的家人对我一如既往的信任和无私的支持。

感谢厦门大学优美的学习和生活环境以及漳州环讯和运元公司给予的系统应用平台。

最后，衷心地感谢诸位教授和老师，在百忙中抽出宝贵的时间审阅本文和出席论文答辩会。

## 攻读硕士学位期间发表的论文

1. 李寅, 陈永明. 开放式和传统数控系统在机床数控化改造上的比较. 福建省科协第七届学术年会-加强自主创新,促进海西装备制造业发展专题学术年会论文集, 2007, (11) : 165-167.

## 附录

刀库换刀 PLC 程序清单

/////////3. M06---POT down/UP, ARM CCW/CW Unclamp/Clamp //////////

//M06/TF SAME BLOCK

RD F7.3

OR R205.4

AND R300.6

WRT R205.4

//M06 START

RD R205.4

AND R200.3

WRT R204.7

//M06 N498

RD R300.6

WRT R205.3

//M06 REG

RD.NOT R204.7

AND R205.3

OR R205.0

AND.NOT R207.6

AND.NOT R207.7

AND R60.1

AND.NOT K4.0

WRT R205.0

//M06 DELAY

RD R205.0

SUB 24

21

200

WRT R62.4

//M06 PULSE

RD R62.4

AND.NOT R205.2

WRT R205.1

//M06 REG1

RD R62.4

WRT R205.2

//POT UP/DN N506

//POT DN FIN N645

//D15=2 INITIAL

RD.NOT R991.1

RD.NOT.STK R991.3

//OR F1.1

OR R310.6

AND.NOT R205.6

AND.NOT R200.4

SUB 23

2

D15

RD R991.1

SUB 24

50

1000

WRT R991.3

RD R810.4

AND.NOT R810.3

SUB 24

25

300

WRT R63.0

//POT UP FIN N646

RD R810.3

AND.NOT R810.4

SUB 24

26

800

WRT R63.1

//POT DOWN SIGNAL

RD R205.4

AND.NOT R200.3

AND R200.2

RD.NOT.STK R205.4

AND.NOT R201.0

AND.NOT R205.7

OR.STK

AND R62.4

AND.NOT R204.0

RD.STK R310.3

AND R199.2

OR.STK

AND.NOT R205.6

AND.NOT R200.4

WRT R205.5

//POT DOWN KEEP

RD R205.5

RD.STK D15.0

AND.NOT D15.1

OR.STK

RD.NOT.STK F1.1

OR.NOT R810.3

AND.STK

//AND.NOT R207.6

WRT D15.0

//POT DOWN REALY

RD D15.0

AND.NOT R960.4

//AND.NOT F1.1

WRT R960.5

//POT UP KEEP

RD R62.4

AND R207.0

RD.STK R310.4

AND R199.2

OR.STK

AND.NOT R205.6

AND.NOT R200.4

AND R202.0

RD.STK D15.1

AND R63.1

OR.STK

AND.NOT R207.1

WRT D15.1

//POT UP RELAY

RD D15.1

OR R960.2

OR R960.3

OR R960.4

AND.NOT D15.0

AND.NOT R960.5

//AND.NOT F1.1

WRT R960.4

////ARM POS1 PULSE???

RD R202.0

AND R62.4

AND R63.0

AND.NOT R207.1

WRT R207.0

////ARM POS1 REG???

RD.NOT R63.0

AND R63.1

OR R207.1

AND R202.0

AND.NOT F1.1

WRT R207.1

//POTUPP FOR M19 CANCEL

RD R207.0

OR R207.2

AND R62.4

AND R202.0

WRT R207.2

//M06 POT DOWN

RD R960.5

OR R205.7

AND R62.4

WRT R205.7

//M06 ARM12 N513

RD R205.1

OR R206.0

AND R62.4

AND.NOT R202.1

WRT R206.0

//TOOL UNCLAMP DELAY N514

RD R63.3

AND R62.4

AND R960.6

SUB 3

5

WRT R50.4

/T UNCLAMP PULSE

RD R50.4

AND.NOT R206.4

WRT R206.3

/T UNCLAMP REG

RD R50.4

WRT R206.4

//M06 ARM23 N517

RD R206.3

OR R206.1

AND R62.4

AND.NOT R202.2

WRT R206.1

//POS 3 TOOL UNCLAMP FINISH N547

RD R202.2

AND R63.3

OR R209.0

AND.NOT R209.2

WRT R209.0

//POS 3 TOOL CLAMP FINISH

RD R209.0

AND R63.2

OR R209.1

AND.NOT R209.2

WRT R209.1

//POS 3 TOOL CLAMP REG

RD R209.1

OR R209.2

AND.NOT R206.2

AND.NOT R202.0

WRT R209.2

//T CLAMP PULSE N518

RD R209.2

AND R63.2

AND R62.4

AND.NOT R206.6

AND.NOT R960.6

WRT R206.5

//T CLAMP REG

RD R206.5

OR R206.6

AND R63.2

WRT R206.6

//M06 ARM31 N520

RD R206.5

OR R206.2

AND R62.4

AND.NOT R202.0

WRT R206.2

//ARM23 UNCLAMP

RD R202.1

OR R206.7

AND R62.4

AND.NOT R202.2

WRT R206.7

//TOOL UNCLAMP RELAY

RD R206.7

OR R208.5

RD.STK R820.0

AND R11.4

OR.STK

WRT R960.6

//TOOL CLM FIN N647

RD R810.6

OR K4.0

AND.NOT R810.7

SUB 24

27

300

WRT R63.2

//TOOL UNCLM FIN

RD R810.7

AND.NOT R810.6

SUB 24

28

50

WRT R63.3

//M06 FINISH N522

RD R63.1

AND R207.1

AND D15.1

RD.STK R207.6

AND R300.6

OR.STK

RD.STK R202.0

AND.NOT R960.0

AND.NOT R960.1

AND F1.1

OR.STK

WRT R207.6

//TOOL NO EXCHANGE

//ATC FIN REG FROM THE TOOL NOW TO D18, THEN D20->THE TOOL  
NOW , THEN D18 TO D20

RD.NOT R991.1

RD.NOT.STK R991.1

RD.STK F1.1

RD.STK R209.1

SUB 18

41

D20

D18 //ATC FIN REG

C2 //JUDGE BY BINARY

WRT R220.0

//D20 TO POT NUM(C2)

RD.NOT R991.1

RD.STK R991.1

RD.STK F1.1

RD.STK R209.1

SUB 18

41

D20

D20 //ATC FIN REG

C2 //JUDGE BY BINARY

WRT R220.0

//D18 TO D20(SPINDLE)

RD R209.1

SUB 8

1111

1111

D18

D20

//TOOL CLEAN N537

RD R206.1

OR K4.6

AND R63.3

SUB 3

6

WRT R50.5

//TOOL CLEAN OFF DELAY

RD R50.5

SUB 3

7

WRT R50.6

//TOOL CLEAN RELAY

RD R50.5

AND.NOT R50.6

OR R208.4

AND.NOT R810.6

WRT R960.7

//ARM START DELAY

RD R802.7

AND R537.2

OR K4.7

AND R63.0

SUB 24

22

200

WRT R62.5

//ARM BRAKE DELAY

RD R202.0

OR R202.1

OR R202.2

RD.NOT.STK R960.1

AND.NOT R960.0

OR.STK

SUB 24

23

1000

WRT R62.6

//ARM BRAKE REG N543

RD R202.0  
OR R202.1  
OR R202.2  
RD.NOT.STK R960.1  
AND.NOT R960.0  
OR.STK  
AND.NOT R62.6  
AND.NOT R209.7  
WRT R209.6

//ARM START REG

RD F7.3  
AND R200.2  
OR.NOT F7.3  
OR R208.6  
AND.NOT R200.4  
AND R62.4  
AND R62.5  
WRT R208.6

//ARM RUN REG

RD R206.0  
OR R206.1  
OR R206.2  
OR R208.0  
OR R208.1  
OR R208.2  
WRT R209.7

//ARM CW RELAY N9

RD R206.0

AND.NOT R202.1

RD.STK R206.1

AND.NOT R202.2

OR.STK

RD.STK R206.2

AND.NOT R202.0

OR.STK

AND R208.6

RD.STK R208.0

AND.NOT R202.1

OR.STK

RD.STK R208.1

AND.NOT R202.2

OR.STK

RD.STK R208.2

AND.NOT R202.0

OR.STK

RD.NOT.STK R209.6

OR K4.5

AND.STK

RD.STK R803.0

AND R117.4

RD.NOT.STK R202.0

AND R199.0

OR R199.1

AND.STK

OR.STK

AND.NOT R960.1

AND.NOT A1.1

WRT R960.0

//ARM CCW RELAY

RD.NOT R202.0

AND R199.0

OR R199.1

AND R803.1

AND R117.4

AND.NOT R960.0

AND.NOT A1.1

AND.NOT R209.6

WRT R960.1

/////////3. M06--POT down/UP, ARM CCW/CW Unclamp/Clamp //////////