

摘 要

伴随着新的控制器件和电机控制方法的出现,交流伺服系统现正朝永磁化、全数字化、高度集成化、控制智能化和模块化方向发展。特别是专用数字信号处理器 DSP 和可编程逻辑器件(FPGA/CPLD)的出现,伺服控制系统真正实现了速度环、位置环和电流环的全数字化控制。本文在设计这个基于 FPGA 运动控制器的交流伺服进给系统试验台上主要做了以下方面的研究:

(1)设计了一种交流伺服进给系统方案。该系统基于“PC+运动控制器”,主要利用 MPC2810 运动控制器作为上位控制单元,采用交流伺服驱动器和伺服电机作为执行机构,采用光栅尺作为直线位移检测装置,设计出一种新型的全闭环运动控制系统,实现对工作台高速和高精度的控制。

(2)分析了驱动系统和机械传动系统的构成以及关于系统中每个硬件的具体结构、特点和功能。

(3)对系统进行软件开发。运动控制器与 PC 机构成主从式控制结构,运动控制器完成运动控制的所有细节;PC 机负责人机交互界面的管理和控制系统的实时监控等方面的工作。MPC2810 运动控制器中配备了功能强大、内容丰富的 Windows 动态链接库,利用 Visual C++6.0 可方便地开发出各种运动控制系统。

(4)通过建立伺服驱动和机械传动系统数学模型,进而获得交流伺服进给系统的数学模型。

(5)以该试验平台为对象,计算了伺服进给系统的相关参数,对伺服进给系统进行 SIMULINK 建模并进行仿真。仿真分析表明,交流伺服进给试验台预期的稳定性和响应特性能满足要求,为数控机床机械部件性能退化评估与寿命预测技术的研究打下了良好基础。

关键词: 交流伺服进给系统 全闭环控制 运动控制器 数学模型 仿真

Abstract

Accompany with the emergence of the new control devices and the motor control method, AC servo system is developing towards permanent magnetization, full digitalization, high integration, control intelligentation and modularization. Especially the appearance of Digital Signal Processing (DSP) and Programmable Logic Device (FPGA/CPLD), servo-control system is really realized fully digital control of velocity loop, current loop and position loop. The following aspects have been carried out in the design of an AC servo feed system experiment rig based on Motion Controller with FPGA in this thesis:

(1) A kind of AC servo feed system scheme is given out. Based on "PC and motion controller", a new type of fully closed-loop motion control system has been designed. In this system, MPC2810 motion controller is used as superior control unit, servo driver and servo motor are employed as actuator, and linear raster sensor is applied as linear displacement detect device. High speed control and high accuracy control of working table, therefore, can be achieved.

(2) The compositions of drive system and mechanical transmission system as well as the structure, the specialty and the function of components in the system are analyzed.

(3) The system software development. The master-slave control structure is made-up by motion controller and PC, the all motion control details are carried out by motion controller, and the management of man-machine interface and the real-time monitor of control system are presided by PC. Because a powerful function and abundant content Windows DLL is equipped in MPC2810 motion controller, we can varrious kinds of motion control system can be easily developped by Visual c ++6.0.

(4) The mathematical model of AC servo feed system is obtained by means of servo drive mathematical modelling and mechanical transmission system modelling.

(5) Aimed at the experiment rig, the relative parameters of servo system are calculated, the AC servo feed system model is built and simulated by SIMULINK. The analysis of the simulation shows that the expected stability and the response performance of system can meet the demand of design. The work done in this thesis can be a good foundation for the research of performance degradation assessment and life prediction technology of NC machine mechanical parts.

Key words: AC servo; feed system; Experenment rig; Fully closed-loop control; Motion controller; Mathematic model; Simulation

第一章 绪论

1.1 研究背景

自 20 世纪 80 年代以来,随着现代电力电子技术、微电子技术、现代控制技术及计算机数字通信技术等学科的深入研究,交流伺服控制技术获得了较大的发展,使得原来交流伺服系统中关于系统稳定性、定位精度低和调速性能差等问题取得了突破性的进展。交流伺服控制系统正向集成化、模块化、数字化和智能化方向发展,主要在软件设计方面,采用了先进的数字信号处理器和微处理器,使得一些先进的控制算法、理论等能够应用于交流调速系统的在线实时控制,从而大大提高了系统的控制性能。如今,高性能交流电动机伺服系统代表了当前伺服驱动系统的发展方向^[1]。因此,研究、开发高性能的交流伺服控制系统,具有非常重要的实际价值和推广意义。

1.2 国内外交流伺服进给系统的发展现状

由于交流伺服技术在硬件技术的发展(高性能永磁材料、电力电子技术、微处理器和计算机技术等方面),和控制理论的发展(PID 控制、模糊控制、神经网络控制、专家控制等),使得其已成为工业自动化的支撑性技术之一。交流伺服进给系统的发展趋势主要集中在以下几个方面^[30]:

(1) 电机永磁化

近年来,随着永磁材料相关技术的快速发展,特别是第三代高性能永磁材料钕铁硼材料的出现,交流永磁同步伺服电动机及其伺服控制系统的性能有了极大提高:

- 1) 退磁曲线基本上为直线;
- 2) 温度系数有所降低;
- 3) 耐高温的工作性能有所提高,价格有所降低;
- 4) 剩磁感应强度、矫顽力、磁能积相比以前有了极大提高。

由于多种永磁材料不断出现,尤其是稀土钴永磁和钕铁硼被发现后,以其高矫顽力、高剩磁密度等优越磁性能,增强了电机抗电枢反应和抗去磁能力,极大提高电机的功率效率和功率因数,从而使得永磁电机得到了很大的发展和广泛的应用。

因为微电子技术的快速发展,电路的集成度越来越高,以及数字信号微处理器速度的大幅度提高,伺服系统的信息处理可完全用软件来完成,交流伺服系统迅速向全数字化方向发展,并由硬件伺服转向软件伺服。同时随着人工智能、模糊算法、神经网络和专家控制等算法应用到伺服系统中,使得伺服系统逐渐向智能化方向发展。数字式伺服系统与模拟式伺服系统相比,具有以下优点:

1) 能够大大降低硬件成本。科技含量更高的微处理器, 软件控制方法不断推陈出新, 逐渐取代了硬件控制, 简化了系统的硬件结构, 同时使得伺服系统中的硬件费用越来越低。

2) 能够大大提高系统的可靠性。因为这种大规模集成电路的故障发生概率比较小。

3) 采用微机处理机的数字控制, 容易与上位机联运, 可随时更改控制参数。

4) 提高了信息存储、监控、诊断以及分级控制的能力, 使系统更趋于智能化。

随着科技的发展, 现代控制理论中提出了鲁棒控制、自适应和变结构等多种控制方法。将这些控制方法与经典理论相结合, 可以大大提高系统的鲁棒性, 提高其抗干扰能力。近年来, 随着人工智能技术的发展, 智能控制技术在伺服系统中的应用也逐渐成熟, 专家系统、模糊集合、人工神经网络等理论逐渐应用到伺服控制技术中。另外, 随着网络技术和现场总线技术的日益成熟, 基于网络的伺服控制也逐渐成为可能。

(3) 网络化、集成化和模块化

在国外, 最近几十年以工业局域网技术为基础的工厂自动化技术得到了很大的发展, 为适应这一趋势, 最新的伺服单元都能与其他控制设备进行网络控制。

伴随着数字控制芯片的发展, 尤其是 DSP 和 FPGA 的发展, 逐渐取代原有的以模拟器为主的控制单元, 使得伺服驱动系统向着高速、高精、高度集成化、高性能化迈进, 而且随着功能的不同都会集成为专用模块。系统根据不同的控制要求, 对软件可进行模块化设计, 可逐个编写系统的功能子模块。采用模块化的软件结构易于对实际应用程序进行修改, 从而使得软件控制的灵活性比较大。

1.3 课题来源与研究意义

本课题来源于国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项子课题“故障预警和诊断技术”(项目编号 20092x04014-102-03)。

研究发展数控机床机械部件性能退化评估与寿命预测技术, 提高预测维护的可靠性, 以主动维护为主, 传统被动维护为辅, 实现对机床精确可靠的维护, 提高其利用率, 缩短维修时间, 这对提高企业的经济效益和社会效益, 促进国民经济的发展具有十分重要的意义。为了能在短时间内得到丝杠、导轨等关键部件的全过程性能退化信息, 首先必须构建一个开放式性能加速退化试验平台, 用来模拟不同工况下数控机床的负载力变化曲线, 研究变化载荷作用下的丝杠、导轨等部件的性能退化规律。

本课题旨在建立一个交流伺服进给试验平台, 为实验室以后对关于数控机床滚珠丝杠性能退化评估与寿命预测做进一步研究。

1.4 课题主要研究内容

本文作者通过查阅大量有关交流伺服系统方面的资料和设计方法, 分析了各种不同

的实现方案，选用了一种基于“PC+运动控制卡”的全闭环控制控制系统，完成了本交流伺服控制系统的总体设计，并通过对该系统进行建模以及 SIMULINK 仿真，得出该系统是稳定的。

本文的主要内容有以下几个方面：

- (1) 交流伺服进给系统总体方案的设计；
- (2) 驱动系统的研究；
- (3) 机械传动系统的研究；
- (4) 系统软件开发；
- (5) 交流伺服进给系统建模及仿真。

第二章 交流伺服进给系统总体方案的设计

2.1 运动控制器系统分类

运动控制器是控制技术和运动系统相结合的产物，是以微处理器为核心，通过软件编程、控制算法设计对机械运动部件的位置、速度等进行实时的控制管理，使其按照预期的运动轨迹和规定的运动参数进行运动^[21]。

(1) 按位置控制原理分类

运动控制系统根据位置控制原理，即有无检测反馈传感器以及检测部位可分为开环、半闭环和闭环三种控制系统。开环控制系统没有检测反馈装置，其一般采用步进电机。作为执行电机。其优点是控制方便，结构简单，成本较低。但系统的稳定性不高，响应时间相对来说很长，精确度不高。主要用于对系统稳定性精确度要求不高的简单的系统。半闭环控制系统一般采用编码器这类反馈装置，安装在伺服电机或丝杠上。全闭环控制系统一般采用光栅尺这类反馈装置，一般将主尺安装工作台（滑板）上，读数头固定在床身或者支架上。因为闭环和半闭环伺服系统具有位移测量和位置比较环节，可消除从电机到被控对象这个系统的传动误差，从而达到比开环系统更高的精度。

(2) 按机械运动的轨迹分类

按运动轨迹可分为点位控制系统、直线控制系统、连续控制系统。点位控制系统又称为点到点控制系统，能实现一个位置到另一个位置的精确移动的系统，即准确控制移动部件的终点位置，但其中间的运动轨迹不需要严格控制的系统。直线控制系统又称为平行控制系统，是指除了控制移动部件从一个点准确地移动到另一个点之外，还要控制其进给的速度以及控制运动按规定点路径到达终点，保证两点之间移动的轨迹是一条直线的系统。连续控制系统又称为轮廓控制系统，是指能够两个或两个以上运动坐标的位移及速度同时进行严格连续控制的系统。这类系统不仅能控制移动部件从一定准确移动到另一点，而且还能控制运动过程中每一点的速度和位移量，因而可以进行曲线或曲面的运动。

(3) 按系统结构分类

目前，运动控制器类型较多，但它们的功能基本上都是从主机接收控制指令，从位置传感器接收位置信息，向伺服电机输出运动指令。目前，运动控制系统按结构大致可分为三类：

1) 以单片机为核心的运动控制系统

单片机具有体积小，成本较低，集成度高等优点。但由于外围电路较为复杂，使用元器件较多，控制软件一般还是用汇编语言来写，同时由于一般的单片机运算速度低，

只能实时实现一些简单的控制算法,因此其开发周期长,软件编程效率低,可靠性和控制精度不高。这种方案一般适用于产品批量较大、控制系统功能较简单的场合。

2)以专用芯片为核心处理器的运动控制系统

这类专用处理器由专用芯片内部电路实现,结构比较简单,集成度高,可靠性高、实时性好,但是它由于专用芯片价格昂贵,而且柔性较差,很难满足特殊客户的需求。这类控制系统对单轴的点位控制场合是基本满足要求的,但不能满足多轴协调运动和高速插补运动。

3)基于 PC 的以 DSP 或 FPGA 作为核心的开放式运动控制系统

这类“PC+运动控制器”的控制系统将 PC 机的开放式、人机交互界面管理和信息处理能力的丰富资源与运动控制器的控制运动轨迹的能力有机地结合在一起,具有运动轨迹运动精确性高,系统稳定性好,并且还能做到实时监控。因为 DSP 很高的数字信号处理能力和 FPGA 的超强逻辑处理能力,所以这类运动控制器可以进行多轴协调运动控制、高速轨迹插补控制。目前,基于 PC 的 DSP 或 FPGA 的运动控制系统在当今世界自动化领域的应用最广泛。

2.2 系统总体方案设计

本系统采用是由“PC+运动控制卡”构成的全闭环控制控制系统如图 2-1 所示,主要由以下几部分组成:具有 PCI 插槽的 PC 机或工控机;MPC2810 运动控制器;松下交流伺服驱动器和电机;机械传动系统;检测元件(编码器、光栅尺)。

该系统的工作原理为:该系统主要采用基于 PCI 总线的 MPC2810 控制卡作为运动控制系统的开发平台,它与 PC 机构成主从式控制结构。PC 机给运动控制卡发出指令后,再通过控制脉冲信号进入驱动器放大后来驱动电机,进而通过丝杠带动工作台运动,编码器返回的脉冲信号进入运动控制卡构成速度环,由安装在工作台上的光栅反馈的位移脉冲信号进入运动控制卡构成位置环,从而实现对工作台的全闭环控制。

该系统不但可使运动部件的静态定位精度由光栅等检测元件的测量精度决定,而且可对各种干扰和非线性因素对运动部件位移产生的影响得到有效的动态校正。

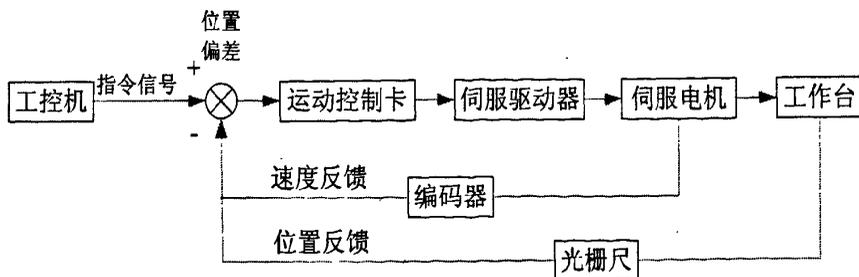


图 2-1 由“PC+运动控制卡”的全闭环运动控制系统

2.3 本章小结

本章主要介绍了国内外常用的几种运动控制系统,选用了一种基于“PC+运动控制卡”的全闭环交流伺服进给系统,并完成了该系统的总体方案设计,该系统主要由伺服驱动系统、机械传动系统两部分组成。

第三章 伺服驱动系统研究

该伺服驱动系统主要包括工控机、MPC2810 控制器、伺服驱动器和电机。

3.1 关于 MPC2810 运动控制器

MPC2810 运动控制器是乐创自动化技术有限公司自主研发生产的基于 PC 的运动控制器，单张卡可控制 4 轴的步进电机或数字式伺服电机。通过多卡共用可支持多于 4 轴的运动控制系统的开发。

MPC2810 运动控制器是一种基于工业 PC 机、用于各种运动场合（包括常速运动、梯形运动、S 形运动等），具有与 PC 机构成主从式控制结构和基于 PCI (Peripheral Component Interconnect)总线而串行通讯控制的运动控制器。运动控制器完成运动控制的所有细节（包括终点位置验证、位置比较输出、直线和圆弧插补、运动中变速度等）；PC 机负责管理好人机交互界面，处理信息和实时监控控制系统等方面的工作（例如，反馈信号的接收、系统状态的监控、指令的发送等等）。

MPC2810 运动控制器配备了开放的运动函数库供使用者在 Windows 系统平台下通过调用 Windows 动态链接库自行开发所需的各种运动控制系统。为当前主要的高级语言编程开发工具，如 VB、VC、Delphi、C++Builder，提供了开发用的 Lib 库及头文件和模块声名文件，可方便进行动态链接库。另外，支持标准 Windows 动态链接库调用的组态软件也可以使用 MPC2810 运动控制器。

MPC2810 运动控制器广泛适用于：机器人作业；数控机床、装配线、激光切割等许多方面^[4]。

3.1.1 特征

MPC2810 运动控制器具有的特点如下^[5]：

- (1) 体积小、成本低。
- (2) 充分利用 PC 机资源，功能强大。
- (3) 高速。为了满足高速响应要求，脉冲输出频率可达 2Mpps。
- (4) 采用高级语言编程，柔性强。应用高级语言编程便于修改，可维护性强，能开发出各种运动轨迹的控制系统。
- (5) 技术难度大，附加值高。
- (6) 抗干扰性。所有数字量输入输出内部都采用光电隔离，确保板卡的抗干扰性。
- (7) 具有插补功能。MPC2810 运动控制器具有 2~4 轴线性插补和 2 轴圆弧插补功能。

(8) 具有事件中断处理功能。

(9) 提供状态处理功能。可进行运动状态查询，位置查询等功能。

(10) 具有编码器高速位置锁存功能。MPC2810 运动控制器可锁存 1、2 路辅助编码器反馈信号。

(11) 提供终点位置验证。控制器自动进行终点位置误差补偿。

(12) 运动方式多样化。例如，独立运动，连续运动，回原点运动，制动等。

(13) 具有软件限位功能。当控制轴的绝对位置到达软件限位点时，控制器自动根据软限位要求，急停或缓停运动。

(14) 跟随误差超限报警功能。当控制轴编码器反馈值与指令脉冲绝对位置超作设置的跟随误差限时，控制卡自动停止控制轴的脉冲输出。

3.1.2 性能规格

MPC2810 卡的性能规格如下表所示：

表1-1 MPC2810运动控制器性能规格

项目	MPC2810
主接口	PCI (3.3、5V两用)
控制轴数	4
编码器输入 (路)	2
编码器输入计数器	两轴32bit符号数±2147483647, A/B/Z相 (2Mpps)
通用数字输入	DC24V 光电耦合18点
通用数字输出	24点, 最大500mA集电极开路
专用输入	每轴4点 (正限位、负限位、原点、减速), 报警 (共用)
脉冲输出最大频率	2MHz
脉冲输出最小频率	0.2Hz
脉冲输出规格	每轴梯形加减速、S形加减速、定制加减速
脉冲输出方式	脉冲/方向输出 (Pulse/DIR), 或双脉冲输出 (CW/CCW)
脉冲输出计数器	每轴32bit符号数±2147483647
Z脉冲最小有效宽度	0.5 μ s
多卡共用	4卡共用
变速	运动中变速度
安全措施	1、2轴可设置跟随误差极限 (容许误差范围±16777216) 提供看门狗定时器 (定时范围1~60000毫秒)
操作系统	WINDOWS 2000、WINDOWS XP

3.1.3 外形结构

其中 4 个运动指示灯位于板卡背面。J1 为 62 芯屏蔽电缆接口，J2 为通用 IO 扩展卡的 40 芯扁平线接口。

旋钮开关用于多卡共用时设定板卡本地 ID（即卡号）。

本产品基于 FPGA 设计，运动控制、数字 IO、PCI 等功能通过 VHDL 硬件描述语言编写到 FPGA 中。因此可以通过改变内部的构成在较短时间内满足客户和 OEM 产品不同规格的要求。

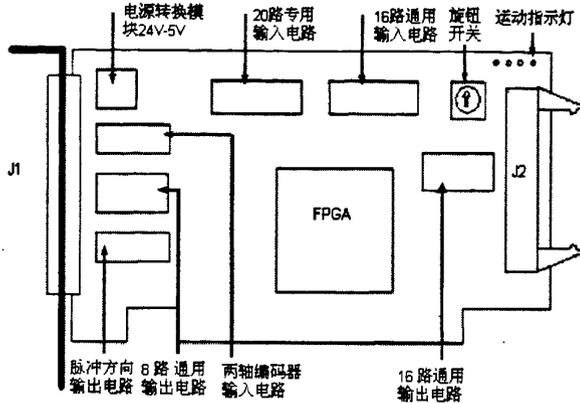


图 3-1 MPC2810 板卡示意图

3.1.4 信号接口定义

MPC2810 提供两种转接板：P62-01 和 P62-02。

P62-01 只设计了与 MPC2810 主要运动控制信号的连接引脚，面积较小，若需较多通用 IO 信号，必须需要增加 P37-05 转接板。本系统只需要一个 P62-01 转接板。

P62-02 转接板集成了 MPC2810 所有专用和通用输入输出信号的外部引脚，使用 P62-02 时不再需要 P37-05，其面积较大。

3.1.5 P62-01 信号接口定义

MPC2810 运动控制器转接板 P62-01 示意图见图 3-2，转接板接口定义如表 3-2 所示。

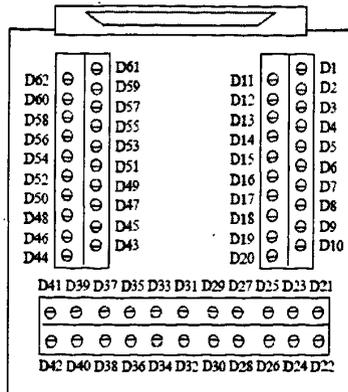


图 3-2 转接板示意图

表3-2 转接板引脚定义

转接板引脚	62 芯电缆 引脚	名称	说明
D1	42	DCV5V	5V 电源正, 板卡输出 (电流不超过 500mA), 与 DCV24V 共地, 可悬空
D2	21	DCV24V	24 电源正, 外部输入
D3	20	OGND	24 电源地, 外部输入
D4	62	SD1	减速 1
D5	41	EL1-	负限位 1
D6	19	EL1+	正限位 1
D7	61	ORG1	原点 1
D8	40	SD2	减速 2
D9	18	EL2-	负限位 2
D10	60	EL2+	正限位 2
D11	39	ORG2	原点 2
D12	17	SD3	减速 3
D13	59	EL3-	负限位 3
D14	38	EL3+	正限位 3
D15	16	ORG3	原点 3
D16	58	SD4	减速 4
D17	37	EL4-	负限位 4
D18	15	EL4+	正限位 4
D19	57	ORG4	原点 4
D20	36	ALM	报警
D21	14	IN17	通用输入 17
D22	56	IN18	通用输入 18
D23	35	-	-
D24	13	-DIN1	编码器 A1- (增减脉冲模式下脉冲 1-)
D25	55	+DIN1	编码器 A1+ (增减脉冲模式下脉冲 1+)
D26	54	-DIN2	编码器 B1- (增减脉冲模式下方向 1-)
D27	34	+DIN2	编码器 B1+ (增减脉冲模式下方向 1+)
D28	33	-DIN3	编码器 Z1-
D29	12	+DIN3	编码器 Z1+

D30	11	-DIN4	编码器 A2- (增减脉冲模式下脉冲 2-)
D31	53	+DIN4	编码器 A2+ (增减脉冲模式下脉冲 2+)
D32	52	-DIN5	编码器 B2- (增减脉冲模式下方向 2-)
D33	32	+DIN5	编码器 B2+ (增减脉冲模式下方向 2+)
D34	31	-DIN6	编码器 Z2-
D35	10	+DIN6	编码器 Z2+
D36		COM1_8	吸收电路, 接外部+24V
D37	30	OUT1	通用输出 1
D38	51	OUT2	通用输出 2
D39	50	OUT3	通用输出 3
D40	8	OUT4	通用输出 4
D41	49	—	保留
D42	29	OUT5	通用输出 5
D43	7	OUT6	通用输出 6
D44	28	OUT7	通用输出 7
D45	48	OUT8	通用输出 8
D46	27	-DOUT1	1 轴方向-
D47	6	+DOUT1	1 轴方向+
D48	5	-DOUT2	1 轴脉冲-
D49	47	+DOUT2	1 轴脉冲+
D50	26	-DOUT3	2 轴方向-
D51	4	+DOUT3	2 轴方向+
D52	46	-DOUT4	2 轴脉冲-
D53	25	+DOUT4	2 轴脉冲+
D54	45	-DOUT5	3 轴方向-
D55	3	+DOUT5	3 轴方向+
D56	2	-DOUT6	3 轴脉冲-
D57	24	+DOUT6	3 轴脉冲+
D58	44	-DOUT7	4 轴方向-
D59	23	+DOUT7	4 轴方向+
D60	1	-DOUT8	4 轴脉冲-
D61	43	+DOUT8	4 轴脉冲+
D62	22	—	保留

3.1.6 典型接线

MPC2810 控制器与松下 MINAS A4 驱动器的接线图如图所示:

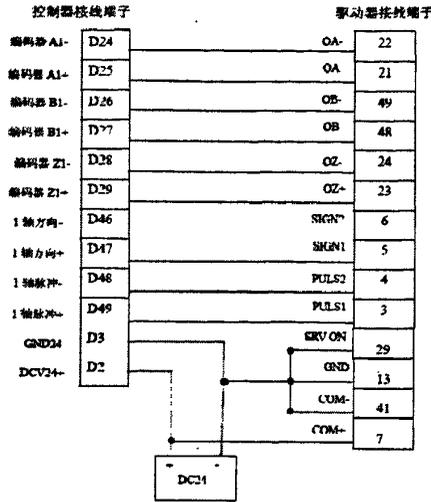


图 3-3 MPC2810 控制器与松下 MINAS A4 系列驱动器接线方式

3.2 伺服驱动器和电机

本系统采用的是松下 MINAS A4 系列 AC 伺服驱动器和电机。该驱动器型号为 MCDD T3520053, 该电机型号为 MHMD 082P1U。驱动器是专为指定电机配套使用而设计的。电机额定转速 3000r/min, 额定功率 750W, 旋转编码器为增量型, 脉冲数为 2500P/r, 分辨率为 10000, 线数为 5。具有的功能为位置控制、速度控制、转矩控制和全闭环控制。本系统中伺服电机采用的是位置控制, 接线图如图 3-4 所示。

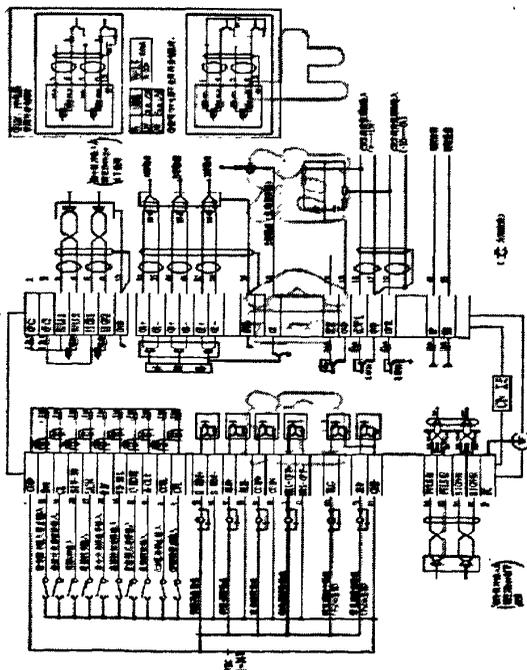


图 3-4 位置控制模式控制信号接线图

3.3 本章小结

本章设计的伺服驱动系统中 MPC2810 运动控制器以 IBM-PC 及其兼容机为主机，基于 PCI 总线的数字式伺服电机的上位控制单元，它与 PC 机构成主从式控制结构。工控机首先发出指令信号到运动控制系统中，然后对工作台的移动用光栅尺进行检测并将测量结果反馈到输入端与指令信号进行比较，再将比较后的偏差通过软件位置调节器发送到运动控制系统中，实现对工作台位置的闭环控制。

第四章 机械传动系统研究

系统机械传动装置如图 4-1 所示, 工作台同时受到 X、Y、Z 三个方向的加力装置施加的作用力: 垂直加力装置施加 Z 向力, 侧向加力装置施加 Y 向力, 轴向制动装置施加 X 向力。

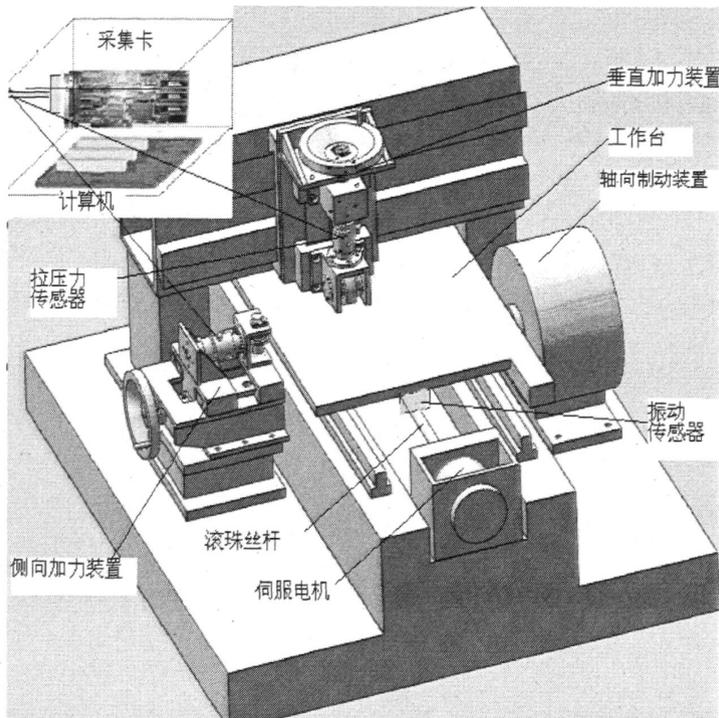


图 4-1 机械传动系统

4.1 垂直加力装置

此垂直加力装置如图 4-2 所示, 主要由底座、手轮、丝杠、后滑台装置、拉压力传感器、前滑台装置构成。

丝杠的梯形螺纹型号为 $Tr16 \times 2$, 垂直负荷为 $3000N$, 设 $n1 = 0.94$, 那么丝杠的驱动扭矩为^[14]

$$T_a = \frac{F_a \times Ph}{2\pi \times n1} = \frac{3000 \times 2}{2\pi \times 0.94} \approx 1016(N \cdot m) \quad (4-1)$$

式中 T_a —驱动扭矩($N \cdot m$);

F_a —轴向负载(N);

Ph —丝杠导程(mm);

$n1$ —进给丝杠的正效率。

手轮型号为16×160,那么施加在手轮上的力为

$$F = \frac{Ta}{r} = \frac{1016}{80} = 12.7(N) \quad (4-2)$$

此力在人所能施加的范围之内,证明此装置的设计是符合要求的。

拉压力传感器采用上海聚人电子科技有限公司 RSS02 型号,额定载荷 0.7t。配套的放大器型号为 RSF-V5,量程为 $-5V \sim +5V$ 。压力输出数据通过采集卡来采集。

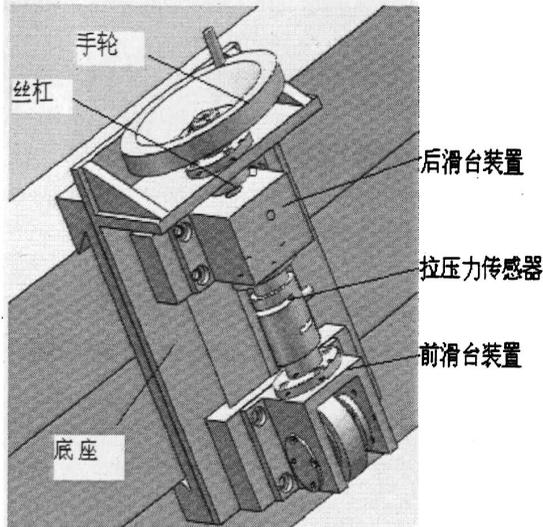


图 4-2 垂直加力装置

4.2 侧向加力装置

此装置的功能和主要部件规格与上节的垂直加力装置一样,它主要用来给试验台施加1000N的侧向力。为了节省成本,此装置的底座采用焊接结构。

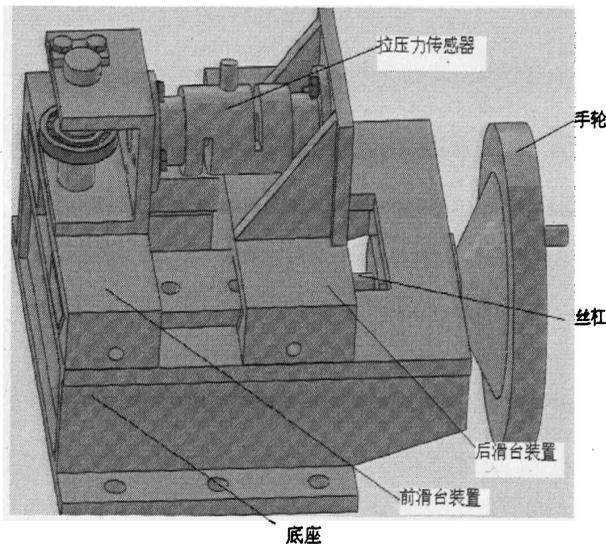


图 4-3 侧向加力装置

4.3 轴向制动装置

此轴向制动装置如图4-4所示，主要由磁粉制动器、齿轮、工作台（附带齿条）组成。

磁粉制动器一般由转子和定子组成，在两者之间借助于磁粉间的电磁吸力形成的磁粉链，利用磁粉磁化时所产生的剪力来制动^[15]。它以磁粉为工作介质，以激励电流为控制手段，达到控制制动或传递扭矩的目的。它具有响应速度快，运行平滑，结构简单，使用可靠等优点。它在机械，化工及其它部门得到了广泛应用，如机械的加载、制动，调速，换向以及卷绕系统中收卷和放卷的张力控制等。

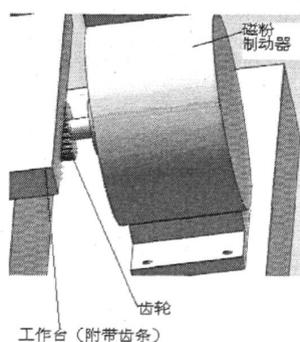


图 4-4 轴向制动装置

磁粉制动器特性为：

(1) 激磁电流与转矩成线性关系

磁粉制动器是根据电磁原理并利用磁粉来传达转矩的，其传达之转矩与激磁电流基本成线性关系。因此，通过调节激磁电流可以控制力矩的大小^[16]。其特性如图4-5所示。

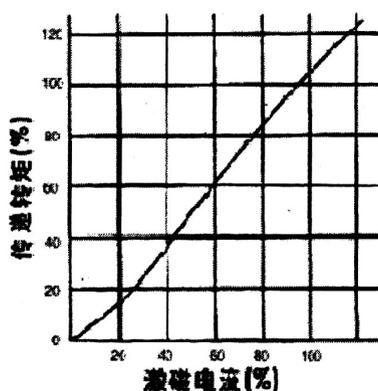


图 4-5 激励电流与传递转矩之间的关系

(2) 稳定的滑差转矩

当激磁电流保持不变时，力矩与转速无关。其传达之转矩不受传动件与从动件之间差速（滑差转速）之影响，即静力矩与动力矩无差别^[17]。其特性如图4-6所示。

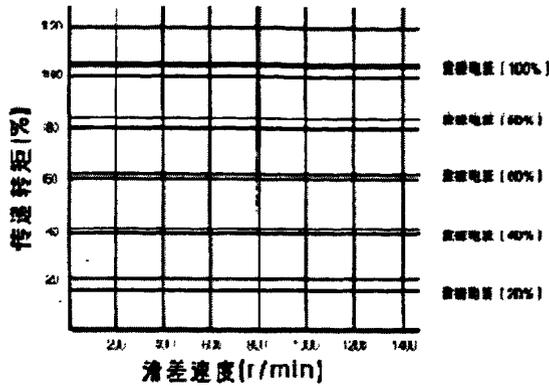


图 4-6 滑差速度与传递转矩之关系

磁粉制动器采用上海卷取电气有限公司生产的型号为FZYJ50，额定转矩T为50Nm，滑差功率为4KW，最大电流为1A，最高转速为1500rpm。标准齿轮的模数m为2.5，齿数z为18,齿条的模数m为2.5。轴向最大制动力为

$$F = \frac{T}{mz/2} = \frac{50 \times 1000}{2.5 \times 18 / 2} = 2222.22N > 2000N \text{ (丝杠轴向负荷)} \quad (4-3)$$

4.4 丝杠的选型

丝杠受到的轴向负荷为2000N，运送质量为100kg，预期寿命时间是1年，行程长度为600mm，最大操作速度为0.25m/s，最大加速度为0.1g，最大转速为3000r/min，每分钟往返次数是20次，定位精度为普通。

由于螺纹有效长度为600mm，定位精度要求不高，则选择C5的精度。估计丝杠总长为1200左右，最大轴向负荷为大约3000N，旋转速度为最大3000r/min。我们采取的安装方法为固定-固定，综上所述按照容许轴向负荷线图如图4-7所示，丝杠选择为外径φ20mm，导程为5mm。螺母选择BNFN形式，丝杠型号则为BNFN2005-5。

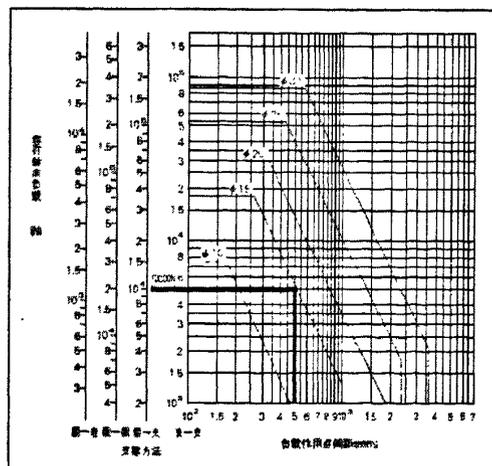


图 4-7 容许轴向负荷线图

丝杠寿命计算为：

$$L_{\min} = \left(\frac{C}{F_A}\right)^3 \times 10^6 = \left(\frac{15.1}{4.5}\right)^3 \times 10^6 = 36.542 \times 10^6 \quad (4-4)$$

其中 F_A 为预压力与轴向力之和， C 为动额定载荷。丝杠寿命换算成时间为 2031h，符合条件。

4.5 本章小结

本章中的机械传动装置主要由工作台、对工作台施加三个方向力的装置（垂直加力装置、侧向加力装置、轴向制动装置）构成。工作台的运动通过与伺服电机相连的滚珠丝杠副传动。

第五章 系统软件开发

该系统主要主要利用Visual C++6.0对控制卡和采集卡进行软件开发来完成运动控制和数据采集功能。

5.1 控制卡编程

MPC2810运动控制器配备了功能强大、内容丰富的Windows动态链接库,可方便地开发出各种运动控制系统。对当前流行的编程开发工具,如Visual Basic6.0, Visual C++6.0提供了开发用Lib库及头文件和模块声名文件,可方便地链接动态链接库,其他32位Windows开发工具如Delphi、C++Builder等也很容易使用MPC2810函数库。另外,支持标准Windows动态链接库调用的组态软件也可以使用MPC2810运动控制器^[8]。

开发控制卡的运动指令顺序主要按照下图所示:

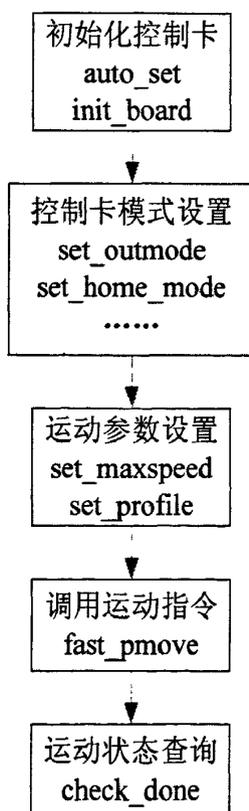


图 5-1 运动指令典型流程图

5.1.1 控制卡初始化

控制器初始化函数有2个,若要使用MPC2810各项功能,必须首先依次调用函数

auto_set、init_board, 完成控制器初始化后才能调用其它函数。初始化函数如表5-1 所示。

表 5-1 控制器初始化函数

函数	返回值	说明
auto_set	≥ 0: 轴数 -1: 错误	自动检测和自动设置控制器
init_board	≥ 0: 卡数 -1: 错误	对控制器硬件和软件初始化

本系统进行控制卡初始化时编写的程序如下：

```
int i;
//初始化板卡
glTotalAxes=auto_set(); //自动设置
if(glTotalAxes<=0)
{
    MessageBox("检测不到卡!");
    return -1;
}
glTotalCards=init_board(); //初始化
if(glTotalCards<=0)
{
    MessageBox("初始化错误!");
    return -1;
}
for(i=0;i<glTotalAxes;i++)
{
    set_sd_logic(i+1,0);
    set_el_logic(i+1,0);
    set_org_logic(i+1,0);
    set_alm_logic(i+1,0);
}
```

5.1.2 控制卡模式设置

该类函数主要用于设置MPC2810 卡控制轴、辅助编码器的使用属性，例如设置各轴脉冲输出模式，各轴的运动方向，编码器反馈信号模式，启动批处理运动，关闭批处理运动等。

5.1.3 运动参数设置函数

该类函数主要用于设置MPC2810 卡运动速度、加速度、位置等参数，以及电机每转脉冲、编码器线数等。

5.1.4 运动指令

按运动类型分类，主要有三种类型：点位运动、连续运动和回原点运动；按运动方式可分为两种类型：独立运动、插补运动；按运动速度可分为两种类型：常速运动、快速运动。下面主要说明独立运动和插补运动这两种类型。

5.1.4.1 独立运动

所谓独立运动指各轴单独进行自己的运动，既包括单轴运动，也包括多轴同时按各自的速度运动。点位运动、连续运动和回原点运动都属于独立运动^[10]。

(1) 点位运动函数

点位运动是指各轴按各自的速度、加速度和行程运动分别移动指定的距离，直到到达目标位置或调用停止指令使轴停止运动，在到达目标位置时自动停止。在多轴运动函数中，各轴同时启动，但不一定同时到达目标位置。它主要有三种运动模式：常速运动模式、梯形曲线运动模式、S形曲线运动模式。点位运动函数中行程参数均以脉冲数作为编程单位。

con_pmoveN(N取1~4)说明用于启动第N个轴以常速作相对位置点位运动；

fast_pmoveN(N取1~4)说明用于启动第N个轴以快速作相对位置点位运动。

1) 常速运动模式

MPC2810 运动控制器提供了4 个常速点位运动函数。con_pmove、con_pmove2、con_pmove3、con_pmove4 说明分别用于启动一个轴、两个轴、三个轴或四个轴，各轴独立以常速方式作点位运动，指令中的位置参数均指相对位移量。启动运动前先调用“set_maxspeed”设置控制轴需要的最大速度（确定了运动控制器脉冲输出倍率及分辨率），然后调用指令“set_conspeed”设置运动速度。注意：多轴启动时不一定同时到达。

本系统在启动常速点位运动时编写的程序如下：

```
void CFastMoveDemoxDlg::OnBtnCs()
{
// TODO: Add your control notification handler code here
UpdateData(TRUE);
int nch;
```

```
long nDis;
double dbVcs,dbVh;

nch = atoi(m_cTaxis);
nDis = atoi(m_cTdis);
dbVh = atof(m_cTvhh);
dbVcs = atof(m_cCS);
////速度设置
set_maxspeed(nch,dbVh);
    set_conspped(nch,dbVcs);
    con_pmove(nch,-nDis);

SetTimer(1,50,NULL);
}
```

2) 梯形曲线运动模式

MPC2810 运动控制器提供了7个梯形模式点位运动处理函数。点位运动是指各轴按各自的速度、加速度和行程运动分别移动指定的距离，直到到达目标位置或调用停止指令使轴停止运动，在到达目标位置时自动停止。点位运动函数中行程参数均以脉冲数为编程单位。

使用“set_s_curve”函数设置某个轴在快速运行时采用哪一种升降速方式。set_s_curve说明运动控制器为点位运动轴提供了三种快速运动模式：梯形曲线，S形曲线和定制加速减速。系统默认为梯形速度模式。

fast_pmove、fast_pmove2、fast_pmove3、fast_pmove4说明分别用于启动一个轴、两个轴、三个轴或四个轴，各轴独立以快速方式作点位运动，指令中的位置参数均指相对位移量。梯形速度由指令“set_profile”设置。启动运动前先调用“set_maxspeed”设置控制轴需要的最大速度（确定了运动控制器脉冲输出倍率及分辨率）。多轴启动时不一定同时到达。

本系统在启动梯形曲线点位运动时编写的程序如下：

```
void CFastMoveDemoxDlg::OnBtnTacc()
{
// TODO: Add your control notification handler code here
UpdateData(TRUE);
int nch;
long nDis;
```

```
double dbVl,dbVh,dbAcc;

nch = atoi(m_cTaxis);
nDis = atoi(m_cTdis);
dbAcc = atof(m_cTacc);
dbVl = atof(m_cTvl);
dbVh = atof(m_cTvhh);

set_maxspeed(nch,dbVh);
set_profile(nch,dbVl,dbVh,dbAcc);
set_s_curve(nch,0);
fast_pmove(nch,nDis);

SetTimer(1,50,NULL);

}
```

3) S 形曲线运动模式

MPC2810 运动控制器提供了 4 个 S 形快速点位运动函数。S 形曲线运动模式只能在批处理运动模式下执行。因此，使用 S 形升降速模式必须调用“open_list”和“close_list”两个函数启动和停止批处理运动。需要注意的是 S 形运动的各个轴必须同时启动或者等待一个轴的 S 形运动结束后，才能启动另一个轴的 S 形运动。启动 S 形运动后，必须等待轴运动停止后，才能启动其它批处理运动。设置 S 形运动的模式，速度，S 段等函数必须在“open_list”和“close_list”之间。

点位运动是指各轴按各自的速度、加速度和行程运动分别移动指定的距离，直到到达目标位置或调用停止指令使轴停止运动，在到达目标位置时自动停止。

set_s_section 在 set_profile 之后调用，设置 S 形段的速度变化量，所设置的 S 升速降速变化量不能大于之前设置的高速的 1/2。set_s_section 说明 set_profile 设置 S 形的初速、高速和最大加速度。

(2) 连续运动函数

连续运动是指各轴按各自的速度、加速度在某一方向一直运动，直到碰到限位开关或调用制动函数才会停止。在 MPC2810 函数库中共提供了八个连续运动指令函数。

con_vmoveN (N 取 1~4) 说明用于同时启动 N 个轴，各轴独立作连续常速运动；

fast_vmoveN (N 取 1~4) 说明用于同时启动 N 个轴，各轴独立作连续快速运动。

(3) 回原点函数

回原点运动是指被控轴按各自设定的速度、加速度在给定的方向一直运动，直到碰到原点信号、限位开关、报警信号或调用停止指令才会停止运动。控制轴在回原点过程中，若先检测到有效的限位信号，控制轴将自动回原点。

MPC2810 运动控制器提供了八个回原点运动函数，运动控制器提供了6种回原点方式，通过接口函数“set_home_mode”设置工作方式，其中方式0~2用于常速运动，方式3~5用于快速运动。

方式0: Origin 立即停止方式。控制轴按给定速度作回原点运动，原点指令一旦调用，就立即停止运动。

方式1: Z 脉冲有效立即停止。控制轴按给定速度作回原点运动，Z 脉冲信号出现时立即停止运动。

方式2: ORG 有效立即反向，遇Z 脉冲立即停止。控制轴按给定速度作回原点运动，原点指令一旦调用，控制轴立即停止并反向运动，遇Z 脉冲停止反向运动。

方式3: 梯形速度模式时，SD 有效减速，当ORG 有效停止运动。控制轴按给定速度作回原点运动，减速信号SD 有效（并保持），控制轴按快速运动方式设置的加速度逐渐减速至低速，当ORG 有效则立即停止运动。

方式4: 梯形速度模式时控制轴按给定速度作回原点运动，原点信号ORG 有效时，控制轴按快速运动方式设置的加速度逐渐减速至低速，直到Z 脉冲有效立即停止运动。

方式5: 梯形速度模式时控制轴按给定速度作回原点运动，原点信号ORG 有效时，控制轴按快速运动方式设置的加速度减速停止。再反向运动，遇Z 脉冲停止反向运动。注意，在该方式下必须使用快速回零指令，若使用常速回零指令，轴接收到ORG 信号和Z 脉冲信号后，运动不会停止。

(1) con_hmove、con_hmove2、con_hmove3、con_hmove4 说明分别用于同时启动一个轴、两个轴、三个轴或四个轴，各轴独立以常速方式作回原点运动，常速度由指令“set_conspeed”设置。

(2) fast_hmove、fast_hmove2、fast_hmove3、fast_hmove4 说明分别用于同时启动一个轴、两个轴、三个轴或四个轴，各轴独立以快速方式作回原点运动，梯形速度由指令“set_profile”设置。

本系统在启动回原点运动时编写的程序如下：

```
void CFastMoveDemoxDlg::OnBtnHome()
{
    // TODO: Add your control notification handler code here
    UpdateData(TRUE);
    int nch;
    long nDis;
```

```
double dbVcs, dbVh;  
  
nch = atoi(m_cTaxis);  
nDis = atoi(m_cTdis);  
dbVh = atof(m_cTvh);  
dbVcs = atof(m_cCS);  
  
set_home_mode(1, 0);  
set_maxspeed(nch, dbVh);  
set_conspeed(nch, dbVcs);  
con_hmove(nch, -1);  
  
SetTimer(1, 50, NULL);  
}
```

5.1.4.2 插补运动函数

插补运动是指两轴或三轴通过一定的算法进行联动，各轴同时启动，最后同时到达终点。插补运动以矢量速度运行^[36]。与插补运动有关的函数有：

(1) 线性插补函数

线性插补运动是指两轴或三轴以矢量速度（常矢量速度或梯形矢量速度）作线性联动，各轴同时启动，然后同时到达终点。

(2) 圆弧插补函数

圆弧插补运动是指两轴或三轴以矢量速度（常矢量速度或梯形矢量速度）作圆弧联动，各轴同时启动，然后同时到达终点。

5.1.5 制动函数

制动相关函数功能说明：

(1) sudden_stop、sudden_stop2、sudden_stop3、sudden_stop4 说明立即运动方式下立即制动函数。它们使各轴立即中止运动。这个函数执行后，控制器立即停止向电机驱动器发送脉冲，使之停止运动。

(2) decel_stop、decel_stop2、decel_stop3、decel_stop4 说明立即运动方式下光滑制动函数。只对快速运动指令（梯形速度、S 形速度）有效，即只有“fast”开始的运动指令（如：fast_hmove、fast_vmove、fast_pmove2 等）才能进行光滑制动。它

们可以使被控轴的速度先从高速降至低速（由set_profile 设定），然后停止运动。光滑制动函数可有效防止快速运动时系统的过冲现象。

(3) move_pause、move_resume 说明这两个指令用于暂停立即运动模式下某轴的当前运动和恢复轴的运动。

对于快速直线插补运动、快速点位运动、快速连续运动、快速回原点运动等，调用“move_pause”函数，控制轴即以设置的梯形速度减速直到停止；调“move_resume”后，控制轴又以梯形速度加速到高速。

对应常速直线插补运动、常速点位运动、常速连续运动、常速回原点运动，调用“move_pause”函数，控制轴立即停止运动；调用“move_resume”后，控制轴立即以常速度运动。

(4) sudden_stop_list、decel_stop_list 说明批处理运动方式下立即停止和光滑制动函数。

(5) move_pause_list、move_resume_list 说明批处理运动和前瞻运动方式下暂停和恢复批处理运动指令。调用“move_pause_list”后，控制器按梯形矢量速度方式减速至低速，最后停止。调用“move_resume_list”后，控制器按梯形矢量速度方式升速至高速，继续原理的运动。

(6) delay_time 说明批处理模式下延时函数。用于将批处理指令延时发出。

5.1.6 位置和状态设置函数

主要包括位置设置函数、位置读取函数、运动状态查询函数和专用输入检测函数。

本系统在进行位置设置、速度查询和位置查询时编写的程序如下：

//使用定时器操作

```
void CFastMoveDemoxDlg::OnTimer(UINT nIDEvent)
```

```
{
```

```
// TODO: Add your message handler code here and/or call default
```

```
double dbSpeed[4];
```

```
double dbAbsPos[4];
```

```
CString strInfo;
```

```
long LFanKui[4];
```

```
//-----
```

```
UpdateData(TRUE);
```

```
int nch;
```

```
long nDis;
```

```
double dbVcs, dbVh;
```

```
long piancha;

nch = atoi(m_cTaxis);
nDis = atoi(m_cTdis);
dbVh = atof(m_cTvh);
    dbVcs = atof(m_cCS);
//-----
get_encoder(1,&LFanKui[0]);//////////获取编码器反馈值
int i;
for(i=0; i<4; i++)
{
    get_abs_pos(i+1, &dbAbsPos[i]);//获取当前位置
    dbSpeed[i] = get_rate(i+1);//获取当前速度
}
strInfo.Format("AbsPos(1~2): %15.2lf %15.2lf", dbAbsPos[0], dbAbsPos[1]);
SetDlgItemText(IDC_STATIC_POS, strInfo);

strInfo.Format("Speed(1~2): %15.2lf %15.2lf", dbSpeed[0], dbSpeed[1]);
SetDlgItemText(IDC_STATIC_SPEED, strInfo);

strInfo.Format("FanKui(1~2): %15.2ld %15.2ld", LFanKui[0], LFanKui[1] );
//反馈
SetDlgItemText(IDC_STATIC_FANKUI, strInfo);
//-----
//闭环控制
piancha=nDis-LFanKui[0];
if(piancha>5)
{
    set_maxspeed(nch, dbVh);
    set_conspped(nch, dbVcs);
    con_pmove(nch, piancha);
}
CDialog::OnTimer(nIDEvent);
}
```

5.1.7 特殊功能函数

电子齿轮控制；手脉控制；看门狗保护；位置比较输出；终点位置验证；跟随误差超限控制；中断事件处理；编码器位置锁存；加减速定制；运动中改变速度；软件限位；正切轴控制；反向间隙补偿。

5.1.8 控制界面设计

因为MPC2810运动控制器配备了丰富，开放的运动函数库供用户在Windows系统平台下使用，通过使用VC++6.0中的MFC来调用Windows动态链接库自行开发这套运动控制系统，最终形成的人机交互控制界面如图5-2所示。

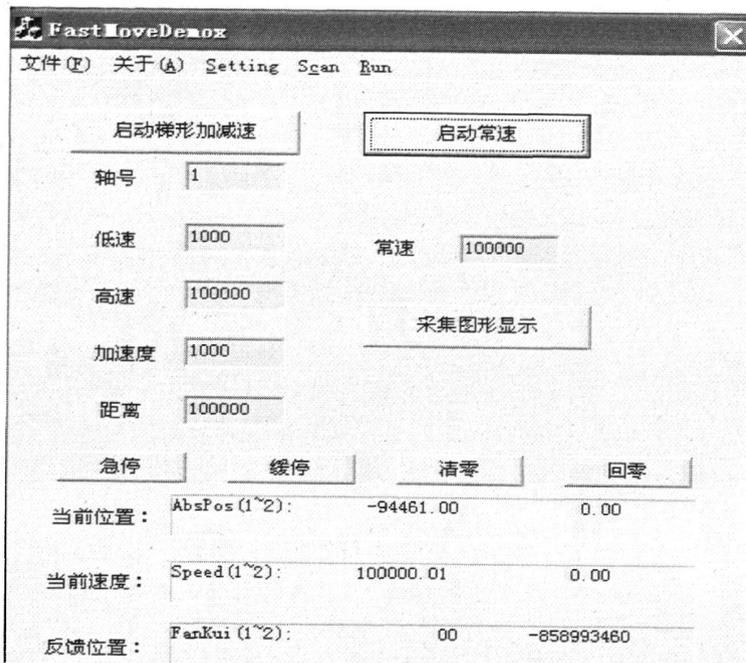


图 5-2 控制界面

5.2 采集卡编程

数据采集是指从传感器和其它待测设备等模拟和数字被测单元中自动采非电量或者电量信号，送到上位机中进行分析，处理。根据整个系统要求，选用台湾研华公司的数据采集卡PCI-1710/1710 HG型。PIC-1710/1710 HG是一款功能强大，低成本多功能PCI总线数据采集卡。主要包括5个功能，即数字量输入和输出、12位A/D转换和D/A 转换以及计数器和定时器功能^[21]。

对数据采集板卡进行编程使用的方式主要有以下三种：软件触发方式，中断方式，DMA 方式^[26]。

(1) 软件方式

系统的数据采集主要是通过查询寄存器的方式获得。这种方式的采集速度比较慢，因此多用于低速数据采集场合。

(2) 中断传输方式

中断方式下，外设需与主机传输数据时要请求主给予中断服务，中断当前主程序的执行，自动转向对应的中断处理程序，控制数据的传输，过程始终是在处理器所执行的指令控制之下。在使用中断传输方式时，必须制定中断级别。

(3) DMA 数据传输方式

尽管应用比较复杂，但由于不需要CPU 的参与，DMA(Direct Memory Access)方式特别适合应用于大量数据的高速采集。直接存储器访问(DMA)方式下，系统中有一个DMA控制器，它是一个可驱动总线的主控部件。当外设与主存储器之间需要传输数据时，外设向DMA控制器发出DMA请求，DMA控制器向中央处理器发出总线请求，取得总线控制权以后，DMA控制器按照总线时序控制外设与存储器间的数据传输而不是通过指令来控制数据传输，传输速度大大高于中断方式。

DMA 方式将板卡上的数据不通过CPU直接传输到内存中，对CPU的占用率最低，一般板卡上会提供单DMA(Single Channel)或者双DMA(Dual Channel)方式。双DMA 方式允许你在传输数据的同时进行采集。

编写程序代码：

(1) 单击Setting 菜单弹出下面的对话框：

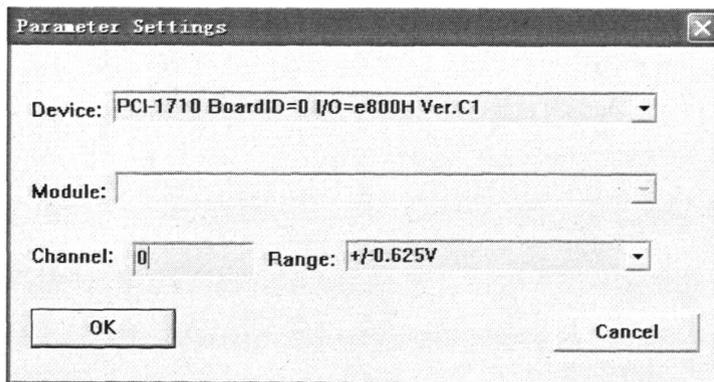


图 5-3 Setting 对话框

Device:显示所安装的设备,如果你安装了多块板卡可以在这里选择支持该例程的板卡;

Channel:选择输入通道;

Range:选择输入范围;

主要编写程序代码如下:

```
void CSettingDlg::OnSelchangeDevice()  
{
```

```
// TODO: Add your control notification handler code here
int i,nOutEntries;
pComboBox=(CComboBox*)this->GetDlgItem(IDC_DEVICE);
m_usDevice=pComboBox->GetCurSel();
// check if there is any device attached on this COM port or CAN
m_sNumOfSubdevices = m_DeviceList[m_usDevice].nNumOfSubdevices;
if (m_sNumOfSubdevices > MAX_DEVICES)
    m_sNumOfSubdevices = MAX_DEVICES;

// retrieve the information of all installed devices
if (m_sNumOfSubdevices != 0)
{
    if ((m_ErrCode = DRV_DeviceGetSubList(
        (DWORD)m_DeviceList[m_usDevice].dwDeviceNum,
        (DEVLIST far *)&m_SubDeviceList[0],
        (SHORT)m_sNumOfSubdevices,
        (SHORT far *)&nOutEntries)) != (LONG)SUCCESS)
    {
        DRV_GetErrorMessage(m_ErrCode, (LPSTR)m_szErrMsg);
        MessageBox((LPCSTR)m_szErrMsg, "Driver Message", MB_OK);
    }

    // initialize the Module List Combobox with the retrieved
    // information
    pComboBox=(CComboBox*)this->GetDlgItem(IDC_MODULE);
    pComboBox->EnableWindow(TRUE);
    pComboBox->ResetContent();
    for (i = 0; i < m_sNumOfDevices; i++)
        pComboBox->AddString((LPSTR)m_SubDeviceList[i].szDeviceName);

    pComboBox->SetCurSel(0);
}
else
{
```

```
pComboBox=(CComboBox*)this->GetDlgItem(IDC_MODULE);
pComboBox->EnableWindow(FALSE);
pComboBox->ResetContent();
}

// -----
// Initialize Input Range List Combobox, it needs to get device
// features for gain list
// -----

// first : Open Device
if (m_sNumOfSubdevices == 0)
{
    m_ErrCode = DRV_DeviceOpen(m_DeviceList[m_usDevice].dwDeviceNum,
        (LONG far *)&m_lDriverHandle);
}
else
{
    m_ErrCode = DRV_DeviceOpen(
        m_SubDeviceList[m_usSubDevice].dwDeviceNum,
        (LONG far *)&m_lDriverHandle);
}

if (m_ErrCode != SUCCESS)
{
    strcpy(m_szErrMsg, "Device open error !");
    MessageBox((LPCSTR)m_szErrMsg, "Driver Message", MB_OK);
}

// second: get device features
m_ptDevFeatures.buffer = (LPDEVFEATURES)&m_DevFeatures;
m_ptDevFeatures.size = sizeof(DEVFEATURES);
if ((m_ErrCode = DRV_DeviceGetFeatures(m_lDriverHandle,
    (LPT_DeviceGetFeatures)&m_ptDevFeatures)) != SUCCESS)
```

```
{
    DRV_GetErrorMessage(m_ErrCode, (LPSTR)m_szErrMsg);
    MessageBox((LPCSTR)m_szErrMsg, "Driver Message", MB_OK);
    DRV_DeviceClose((LONG far *)&m_lDriverHandle);
}

// third: initialize Input Range List Combobox with device features
if (m_DevFeatures.usNumGain != 0)
{
    pComboBox=(CComboBox*)this->GetDlgItem(IDC_INPRANGE);
    pComboBox->EnableWindow(TRUE);
    pComboBox->ResetContent();

    for (i = 0; i < (int)m_DevFeatures.usNumGain; i ++)

pComboBox->AddString((LPSTR)m_DevFeatures.glGainList[i].szGainStr);

    pComboBox->SetCurSel(0);
}
else
{
    pComboBox=(CComboBox*)this->GetDlgItem(IDC_INPRANGE);
    pComboBox->EnableWindow(FALSE);
    pComboBox->ResetContent();
}

// fourth: close device
DRV_DeviceClose((LONG far *)&m_lDriverHandle);
}
```

(2) 单击Scan, 弹出下面的对话框

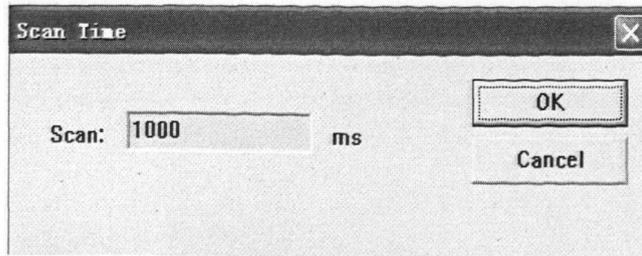


图 5-4 Scan 对话框

可以设置计数的时间间隔，默认值为1000 毫秒。

(3) 单击Run 菜单项中的Start 菜单就可以开始软件触发模式数据采集，单击Stop 项停止。

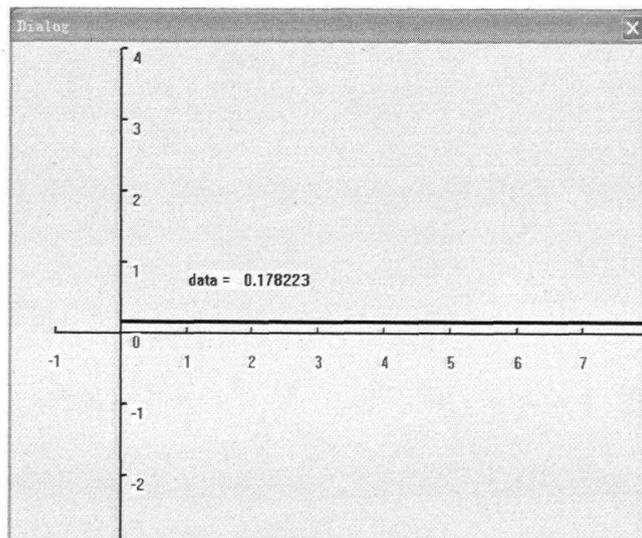


图 5-5 采集数据显示图

主要编写程序代码如下：

```
//绘制坐标  
void CGraph::DrawAxes()  
{  
//建立画笔  
CDC *pDc;  
pDc=GetDC();  
CPen cpen, pen;  
//pDc->SelectObject(&pen);  
//pen.CreatePen(PS_SOLID, PS_GEOMETRIC, RGB(255, 0, 0));  
cpen.CreatePen(PS_SOLID, 2, RGB(0, 0, 255));  
pDc->SelectObject(&cpen);
```

```
//指定原点-----  
pDc->SetViewportOrg(100, 245);  
pDc->SetTextColor( RGB(255, 0, 0) );  
  
//绘制横坐标-----  
//CString  
sPIText[]={"-1/2π", "", "1/2π", "π", "3/2π", "2π", "5/2π", "3π", "7/2π", "4π", "9/  
2π", "5π"};  
CString sPIText[]={"-1", "", "1", "2", "3", "4", "5", "6", "7", "8", "9", "10"};  
for( int n=-1, nTmp=0; nTmp<=660; n++, nTmp+=60 )  
{  
    pDc->LineTo( 60*n, 0 );  
    pDc->LineTo( 60*n, -5 );  
    pDc->MoveTo( 60*n, 0 );  
    pDc->TextOut( 60*n-sPIText[n+1].GetLength()*3, 16, sPIText[n+1] ); // (x坐  
标, y坐标, str)  
}  
  
pDc->MoveTo( 0, 0 ); //回到原点  
  
//绘制纵坐标-----  
    CString sTmp;  
  
for( n=-4, nTmp=0; nTmp<=180; n++, nTmp=60*n )  
{  
    pDc->LineTo( 0, 60*n );  
    pDc->LineTo( 5, 60*n );  
    pDc->MoveTo( 0, 60*n );  
    sTmp.Format( "%d", -n );  
    pDc->TextOut( 10, 60*n, sTmp );  
}  
  
//-----
```

```
cpen.DeleteObject();
pen.DeleteObject();
}

//图形显示
void CGraph::LineToPos(int x, int y)
{
    //建立画笔-----
    CDC *pDc;
    pDc=GetDC();
    CPen cpen,pen;
    pen.CreatePen(PS_SOLID, 3, RGB(0, 0, 0));
    pDc->SetViewportOrg(100, 245); //指定原点
    //cpen.CreatePen(PS_SOLID, 2, RGB(0, 0, 255));

    //-----
    //float y;
    pDc->SelectObject(&pen);

    //弧度=X坐标/曲线宽度*角系数*π
    //Y坐标=振幅*曲线宽度*sin(弧度)
    // radian=x/((double)60*2)*PI;
    // y=sin(radian)*2*60;
    // y=-60*m_fVoltage;
    pDc->MoveTo(x, y);
    pDc->LineTo(x, y);

    pen.DeleteObject();
    ReleaseDC(pDc);
}

//使用定时器操作
void CFastMoveDemoxDlg::OnTimer(UINT nIDEvent)
```

```
{
// TODO: Add your message handler code here and/or call default

//采集
    if(nIDEvent==2)
    {
        DWORD    dwErrorTime;
        RECT      rect;

        DWORD      dwCurrentTime = GetTickCount();

        m_dwElapseTime = m_dwElapseTime + (DWORD)m_usScanTime;
        dwErrorTime = dwCurrentTime - m_dwElapseTime - m_dwStartTime;
        if (dwErrorTime > (DWORD)40) // maximum 40 ms scan time
        {
            m_dwElapseTime = dwCurrentTime - m_dwStartTime;
            m_usOverrunCount ++;
            if (m_usOverrunCount >= 10)
            {
                m_bTimerOverrun = TRUE;
                m_usOverrunCount = 0;
            }
            else
                m_bTimerOverrun = FALSE;
        }
        else
        {
            m_bTimerOverrun = FALSE;
            m_usOverrunCount = 0;
        }

        //
        // reads an analog input channel
        //
```

```
m_ptAIVoltageIn.chan = m_usChannel;
    m_ptAIVoltageIn.gain = m_ptAIConfig.DasGain;
    m_ptAIVoltageIn.TrigMode = 0;           // internal trigger
    m_ptAIVoltageIn.voltage = (FLOAT far *)&m_fVoltage;

if ((m_ErrCode = DRV_AIVoltageIn(m_lDriverHandle,
    (LPT_AIVoltageIn)&m_ptAIVoltageIn)) != 0)
{
    DRV_GetErrorMessage(m_ErrCode, (LPSTR)m_szErrMsg);
    KillTimer(m_uiTimer);
    MessageBox((LPCSTR)m_szErrMsg, "Driver Message", MB_OK); //1
    DRV_DeviceClose((LONG far *)&m_lDriverHandle);
    return;
}

//
// Display Data
//

CDC* pDC1=m_cG.GetDC(); //显示在另外一个对话框上
    GetClientRect(&rect);
if (m_bTimerOverrun == FALSE)
    sprintf(m_szBuffer, "data = %10.6f", m_fVoltage);
    // m_szBuffer.Format("data = %10.6f", m_fVoltage);
else
    sprintf(m_szBuffer, "Timer Overrun! data = %10.6f", m_fVoltage);
RedrawWindow();
pDC1->DrawText(m_szBuffer, &rect, DT_SINGLELINE | DT_CENTER |
DT_VCENTER);
    ReleaseDC(pDC1);
//-----
float k;
for(int j=0; j<600; j++)
```

```
{  
    k=-60*m_fVoltage;  
    m_cG.LineToPos( j, (int)k);    //画线  
}  
//-----  
CDialog::OnTimer(nIDEvent);  
}
```

5.3 本章小结

本章节通过对控制卡和采集卡在上位机上的编程作了详细的介绍,获得了交流伺服进给系统的一些运动控制、反馈、状态查询等功能以及采集数据的功能,并编辑出了这个交流伺服控制系统的人机交互界面。

第六章 交流伺服进给系统建模

6.1 交流伺服进给系统的一般组成结构

数控机床伺服进给系统在结构上虽然形式是多种多样的，但在结构上都有它们的共同之处。闭环伺服进给系统在结构上与半闭环伺服进给系统无本质区别，而与开环伺服进给系统的根本区别，只在于无位置检测反馈环节而已。因此，伺服进给系统的一般组成结构可以通过用图6-1所示的结构框图来表示。其主要组成部分及功能如下^[38]：

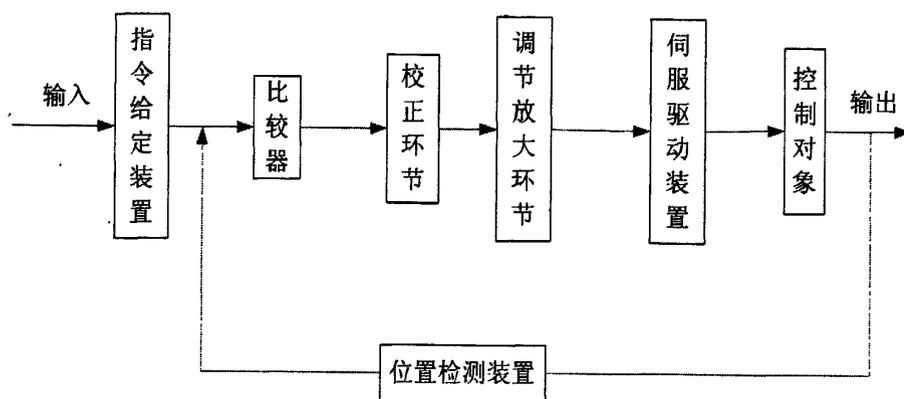


图 6-1 交流伺服进给系统的一般组成结构

1) 指令给定装置

伺服进给系统的指令给定装置一般都装置在数控系统内的，它的作用是将速度和位置指令输给伺服进给系统，使伺服进给系统中的执行机构完成速度和位置动作。

2) 比较器

这环节是将输入信号与位置反馈信号进行比较。从比较器输出的位置偏差信号，经过调节放大环节后，驱动伺服驱动装置，使系统朝着偏差减少的方向运行，直至偏差为零时，系统才停止工作。

3) 校正环节

一般串联在偏差信号之后。它的作用是由于改善系统的特性，如减少系统的死区，提高系统相应的快速与稳定性等。

4) 调节放大环节

这环节是将偏差信号转换成电压信号，经放大后输给伺服驱动装置。校正环节和调节放大环节统称为调节器。这一部分的质量优劣与系统的品质有很大关系。

5) 伺服驱动装置

伺服驱动装置在获得调节器的电压信号后，通过输出功率足够的运动速度来控制对象的运动。

6)控制对象

控制对象就是进给系统的机械传动系统,它一般输出的是以某一运行速度的位移量,也即是系统的被调量。

7)检测装置

检测装置用来测量执行部件的实际位移量,将它转换成电信号反馈到输入端,在比较器中与输入指令信号进行比较。从指令给定装置到伺服驱动装置构成伺服驱动系统。另一部分构成机械传动机构。

6.2 交流伺服进给系统的组成环节

在数控机床交流伺服系统中都大量采用三相永磁同步伺服电动机,其数学模型具有多变量、非线性及强耦合的特点。矢量控制的三相永磁同步电动机伺服系统一般由位置环、速度环和电流环组成。在三环结构中,位置环为外环,电流环和速度环为内环。系统的原理如图6-2所示^[30]。

位置环的作用是保证系统静态精度和动态跟踪性能,使整个伺服系统能稳定运行。半闭环结构以伺服电机轴的角位移为反馈量,全闭环结构以工作台的直线位移作为系统的位置反馈量。开环结构不具备位置环。位置环的作用是产生电机的速度指令并使电机准确定位和跟踪,通过设定的目标位置与电机反馈的实际位置相比较,利用其偏差通过位置调节器来促使电机起动,使电机加速并以最大速度恒速运行,然后使电机减速运行直至停止运动^[9]。

速度环的作用是保证电机的转速与指令值一致,通过增强系统抗负载扰动的能力来抑制速度波动。根据系统对各个控制环的要求,为了提高系统的快速跟踪能力,可以对速度环和电流环加以PID控制。在电流环的基础上,加入速度反馈形成电流速度双闭环。速度环中速度调节器的输出作为电流调节器的给定量应限制在一定的幅值内(限制最大电枢回路的电流值)。因此,通常采用比例积分控制方式来改善输出响应,并在稳态实现无差控制。有时加上微分控制方式,以提高系统的快速性。但是加微分控制有个缺点就是会加宽系统频带,降低了系统的抗干扰能力^[10]。

电流环的作用是改造内环控制对象的传递函数,提高系统的快速性;限制最大电流,使系统有足够的加速转矩;抑制电流环内部干扰。电流环是伺服系统控制结构中的最内环,其性能是整个伺服系统性能基础,从而必须优化好电流环控制参数,是电流闭环特性具有良好的动态响应和抗干扰性^[11]。

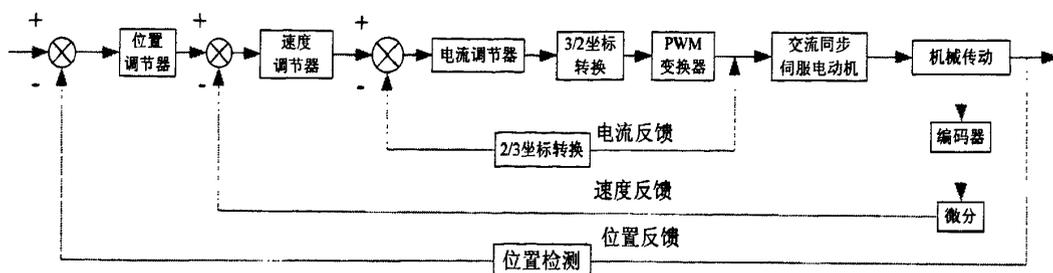


图 6-2 交流伺服进给系统原理图

6.3 数学模型建立方法和步骤

数学建模是一种数学的思考方法，是运用数学的语言和方法，通过抽象、简化建立能近似刻画并解决实际问题的数学模型的一种强有力的数学手段。这里的描述不但包括外在形态，内在机制的描述，也包括预测，试验和解释实际现象等内容。

为分析、研究系统的动态特性，或对系统进行控制，首先必须建立数学模型。所谓建立数学模型，即利用微分方程式来描述系统和元件的特性。只有建立了数学模型，才能用各种分析方法和计算工件，对系统进行分析 and 综合。当系统可以用线性微分方程来描述时，这种系统称为线性系统。数控机床伺服进给系统主要由传递函数和微分方程来描述^[9]。

6.3.1 建立数学模型时的工程简化方法

实际的控制系统在结构以及影响因素方面，都是非常复杂的。因此，在建立数学模型时，必须把某些性能理想化同时必须忽略某些次要因素，但同时又要尽可能使所建立的数学模型能较准确地表达实际控制系统，使这个系统既简化又准确。

建立系统的数学模型有分析法和实验法两种。分析法根据系统及元件各变量之间所遵循的基本物理、化学等定律，在列写方程的过程中消去中间变量，求出系统输出与输入的数学表达式，其中往往要进行必要的简化，如线性化，即忽略一些次要的非线性因素。实验法是指如果不知道系统的传递函数，但知道它是线性定常系统，且其传递函数为 s 的有理分式，这时可对系统中某些典型输入信号的响应或其它实验数据建立数学模型。这种用实验数据建立数学模型的方法也称为系统辨识^[19]。

6.3.2 建立数学模型的步骤

建立数学模型主要按下面的步骤进行^[20]：

- (1)分析系统的工作原理，确定系统的输入与输出；
- (2)根据各变量所遵循的基本定律，列写微分方程；
- (3)消去中间变量；

(4)对于线性系统,初始条件为零,对各微分方程进行拉氏变换后求得系统或元件的传递函数,画出其方框图。

6.4 交流伺服驱动系统的数学模型

对伺服驱动系统中的各组成单元进行分析,建立模型如下^[30]:

6.4.1 位置检测单元

位置检测单元一般可近似为非惯性环节,作用等同于一个比例放大器,从而有

$$P_L(t) = K_H X_L(t) \quad (6-1)$$

式中 K_H —位置反馈增益(脉冲/mm);

$P_L(t)$ —位置反馈脉冲数;

$X_L(t)$ —工作台位移(mm)。

6.4.2 位置控制单元

位置输入指令与实际位置反馈之差值,经D/A转换与放大后,变为速度指令电压,作为速度环的输入。位置控制单元的作用是一个比例放大环节,因此有

$$U_c(t) = K_u [P_p(t) - P_L(t)] = K_u [P_p(t) - K_H X_L(t)] \quad (6-2)$$

式中 K_u —位置放大器的增益(V/脉冲);

$U_c(t)$ —位置环的指令电压(V);

$P_p(t)$ —位置指令脉冲。

6.4.3 速度检测单元

一般看来,测速发电机的固有频率很高,故速度检测反馈回路可认为是一个无惯性环节,因此

$$U_g(t) = K_f \frac{d\theta_M(t)}{dt} \quad (6-3)$$

式中 K_f —速度环反馈系数($v \cdot s / rad$);

$U_g(t)$ —速度环反馈电压(V);

$\theta_M(t)$ —电动机轴转角(rad)。

6.4.4 速度控制单元

速度环的输入指令电压与实际反馈电压之差值为速度误差信号,经速度控制单元转换与放大后,变为电动机的电枢控制电压。于是为了简化处理,通过忽略其非线性和滞后特性后,也可以将其认为是一个比例放大环节,因此有:

$$U_M(t) = K_a[U_c(t) - U_g(t)] = K_a[U_c(t) - K_f \frac{d\theta_M(t)}{dt}] \quad (6-4)$$

式中 K_a —速度放大器增益(V/V);

$U_M(t)$ —电枢回路输入电压(V)。

6.4.5 永磁同步电机

6.4.5.1 数学模型的建立

交流永磁同步电机 (PMSM)的基本方程包括电动机的转矩方程和运动方程等, 这些方程是永磁同步电动机数学模型的基础。PMSM在运转时的电磁关系十分复杂, 再加上磁路饱和等非线性因素, 使得建立电机的精确数学模型变得很困难。我们做出一些假设, 以便更方便的分析永磁同步电机的数学模型^[13]:

- (1) 忽略谐波分量, 认为定子磁场呈正弦规律分布;
- (2) 不计电动机铁芯的饱和;
- (3) 不考虑涡流和磁滞损耗, 认为磁路是线性的;
- (4) 永磁体的导磁率为零;
- (5) 假设三相供电电压是平衡的。

如图6-3所示的PMSM等效结构坐标图, 取转子的轴线与定子A相绕组的电气角度为 θ , 再取 oa 、 ob 、 oc 为三相定子绕组的轴线^[30]。

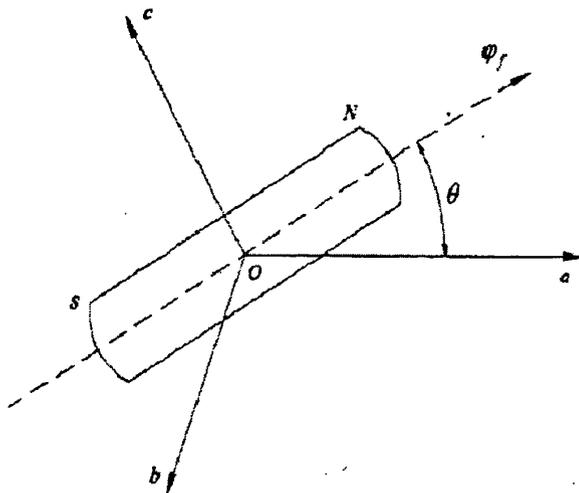


图 6-3 PMSM 等效结构坐标图

6.4.5.2 永磁同步电机的坐标变换

三相定子交流电主要是产生一个旋转的磁场, 因为两相相位正交的对称绕组通过两相相位相差 90° 的交流电时, 也能产生旋转磁场。在PMSM中, 建立固定于转子的参考坐

标,以a相绕组轴线为参考轴线,取磁极轴线为d轴,顺着旋转方向超前 90° 电角度为q轴,d轴与参考轴之间的电气角为 θ ,坐标图如图6-4所示^[30]。

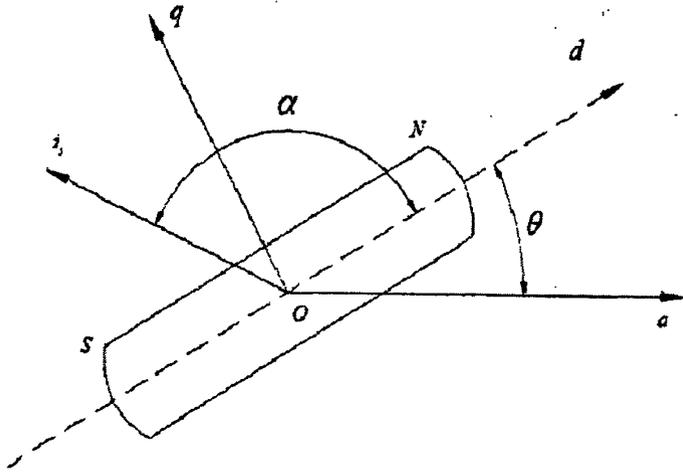


图 6-4 永磁同步电动机 dq 旋转坐标图

根据功率不变的约束条件,从而可以建立dq旋转坐标中和三相静止坐标中的电机模型之间的变换关系^[22]:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{\sqrt{1}}{2} & \frac{\sqrt{1}}{2} & \frac{\sqrt{1}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (6-5)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{\sqrt{1}}{2} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{\sqrt{1}}{2} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{\sqrt{1}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} \quad (6-6)$$

6.4.5.3 永磁同步电机在 dq 轴旋转坐标系中的基本方程

在dq旋转坐标系中PMSM的电压、磁链、转矩方程和运动方程如下:

电压方程为:

$$u_d = Ri_d + \frac{d}{dt}(L_d i_d + L_{md} i_f) - \omega L_q i_q \quad (6-7)$$

$$u_q = Ri_q + \frac{d}{dt}(L_q i_q) + \omega(L_d i_d + L_{md} i_f) \quad (6-8)$$

磁链方程为:

$$\varphi_q = L_q i_q \quad (6-9)$$

$$\varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \quad (6-10)$$

$$\varphi_f = i_f + L_{md} \quad (6-11)$$

转矩方程为:

$$T_e = p_n(\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) = p_n(\varphi_f i_q - (L_q - L_d) i_d i_q) \quad (6-12)$$

运动方程为:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - B\omega_r - T_L \quad (6-13)$$

式中 $\omega = p_n \omega_r$ 为转子电角速度; u_d 、 u_q 为dq轴定子电压; i_d 、 i_q 为dq轴定子电流; φ_d 、 φ_q 为dq轴定子磁链; φ_f 为转子上的永磁体产生的磁势; L_d 、 L_q 为dq轴定子电感; J 为转动惯量($kg \cdot m^2$); T_L 为负载转矩, 是输出转矩 $N \cdot m$; B 为粘滞摩擦系数; ω_r 为转子角速度; p_n 为极对数。

PMSM的运动特性在电动机的转矩又是由电流和磁场共同决定的, 而负载转矩 T_L 不变的情况下, 主要由输入转矩 T_e 的大小决定, 所以对电动机转矩的控制实际等同于对电流和磁场的控制。

PMSM的等效电路:

事实上, 对于PMSM来说dq轴线圈的漏感相差, 可以认为近似相等。因此, 电感参数可以表示为:

$$L_q = L_{s\sigma} + L_{mq} \quad (6-14)$$

$$L_d = L_{s\sigma} + L_{md} \quad (6-15)$$

式中, $L_{s\sigma}$ 是dq周线圈的漏感。 i_f 为归算后的等效励磁电流, $i_f = \frac{\varphi_f}{L_{md}}$, 则PMSM的

永磁同步电机转子为圆筒形($L_d = L_q = L$), 在假设磁路不饱和, 不计磁滞和涡流损耗的情况下, 空间磁场呈正弦分布的条件下, 摩擦系数 $B=0$, 得dq坐标系上PMSM的状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d \\ \dot{i}_q \\ \dot{\omega}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & p_n \omega_r & 0 \\ -p_n \omega_r & -R/L & -p_n \varphi_f / L \\ 0 & p_n \varphi_f / J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_d}{L} \\ \frac{u_q}{L} \\ -\frac{T_L}{J} \end{bmatrix} \quad (6-16)$$

式中, R —绕组等效电阻(Ω); p_n —极对数; L_d —等效d轴电感(H); L_q —等效d

轴电感 (H); ω_r —转子角速度(rad/s); φ_f —转子磁场的等效磁链 (Wb); T_L —负载转矩 ($N\cdot m$); i_q —q轴电流 (A); i_d —d轴电流 (A); J —转动惯量 ($kg\cdot m^2$)。

6.4.5.4 永磁同步电机的矢量控制方法

为获得线性状态方程, 通常采用 i_d 恒等于 0 的矢量控制方式, 此时有:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_q \\ \dot{\omega}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R/L & -p_n\varphi_f/L \\ p_n\varphi_f/J & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_q/L \\ -T_L/J \end{bmatrix} \quad (6-17)$$

即为PMSM的线性状态方程。

伺服进给系统所用的永磁同步交流伺服电机进行近似线性化解耦是采用电流控制方式, 可控制电流矢量与转子磁场矢量成 90° , 使 $i_d = 0$, 则电磁转矩方程式可写为:

$$T_e = p_n\varphi_f i_q = K_c i_q \quad (6-18)$$

式中, K_c 称为转矩系数, 在 $i_d = 0$ 的条件下, 电磁转矩仅与 i_q 成正比。只要控制 i_q 就得到线性的控制转矩, 获得和直流电机一样的控制性能, 这就是交流电机的矢量控制的目的。

在零初始的条件下, 对PMSM的解耦状态方程求拉氏变换, 以电压 u_q 为输入, 转子速度为输出的电机系统框图如图6-5所示。

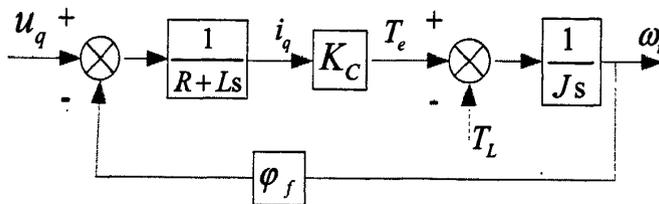


图6-5 永磁同步电机系统框图

6.5 机械传动装置动力学模型

机械传动机构本身是一个动力学系统, 它承受的外力有切削抗力, 电机的输入力矩, 导轨及传动件的固体摩擦力, 和各传动部件与导轨上的阻尼力。机械传动机构如图6-6所示, 以伺服电机的角位移 $\theta(t)$ 作为机械传动的输入, 以工作台的运动 $X(t)$ 作为输出。电机通过联轴节与滚珠丝杠直接相连, 滚珠丝杠螺母副驱动工作台作直线运动^[30]。

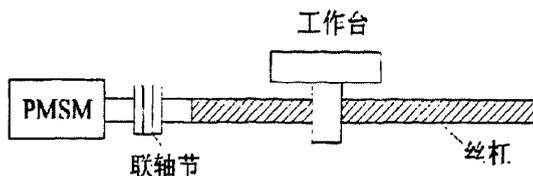


图 6-6 机械传动机构示意图

在模型建立过程中, 各部分之间由刚性元件与粘性元件连接, 假设满足如下条件^[22]:

(1)滚珠丝杠与伺服电机的联轴器等效为刚性联接;

(2)滚珠螺母的质量可忽略不计;

(3)工作台位置的变化不影响刚度的变化。

电动机轴的输出转矩, 将驱动机械传动装置。将整个机械传动装置的刚度、阻尼、惯量以及作用在它上面的干扰转矩, 都归算到丝杠上, 可得如图6-7所示的动力学模型^[30]。

由动力学可知, 丝杠上的动力方程为

$$M_s = J_L \frac{d^2\theta_L}{dt^2} + f_L \frac{d\theta_L}{dt} + M_{gr} \quad (6-19)$$

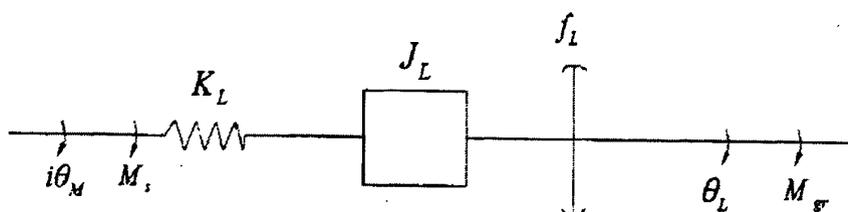


图 6-7 机械传动系统的动力学模型

式中 J_L —机械传动部件折算到丝杠上的转动惯量($\text{kg}\cdot\text{m}^2$);

θ_L —丝杠的输出端转角(rad);

f_L —机械传动部件折算到丝杠上的粘性阻尼系数($\text{s}\cdot\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$);

M_{gr} —折算到丝杠上的干扰转矩($\text{N}\cdot\text{m}$);

M_s —折算到丝杠上的总转矩($\text{N}\cdot\text{m}$)。

并且在弹簧的线性变形范围内有

$$M_s = K_L [i\theta_M - \theta_L] \quad (6-20)$$

式中 K_L —机械传动部件折算在丝杠上的扭转刚度($\text{N}\cdot\text{m}/\text{rad}$);

i —电机与丝杠之间的传动比, $i=1$ 。

最终通过丝杠螺母传动, 将丝杠的转动变为工作台的直线运动

$$x_L = i_{pt} \theta_L \quad (6-21)$$

式中 i_{pt} —丝杠螺母副的传动比 $i_{pt} = \frac{P_h}{2\pi}$ (mm/rad), P_h 为丝杠导程。对(6-19)和(6-20)

两式进行拉氏变换得:

$$M_s(s) = [J_L s^2 + f_L s] \theta_L(s) + M_{gr}(s)$$

$$M_s(s) = K_L [\theta_M(s) - \theta_L(s)]$$

整理后得到

$$\theta_L(s) = \frac{K_L \theta_M(s) - M_{gr}}{J_L s^2 + f_L s + K_L} \quad (6-22)$$

如果以 $\theta_L(s)$ 为系统的输出, $\theta_M(s)$ 为输入, M 为扰动输入, 则 $M_{gr} = 0$ 的情况下, $\theta_L(s)$ 与 $\theta_M(s)$ 之间的传递函数为

$$G(s) = \frac{\theta_L(s)}{\theta_M(s)} = \frac{K_L}{J_L s^2 + f_L s + K_L} \quad (6-23)$$

令 $\sqrt{K_L/J_L} = \omega_n$, $f_L/2\sqrt{J_L K_L} = \xi$ 则上式可变成如下的标准形式

$$G(s) = \frac{\theta_L(s)}{\theta_M(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (6-24)$$

可见机械传动系统是一个固有频率为 ω_n , 阻尼比为 ξ 的二阶系统。

6.6 交流伺服进给系统的数学模型

在分析了进给伺服系统的各组成元件或环节的数学模型后, 就可以得到这个进给伺服系统的数学模型和它的传递函数。将伺服驱动环节和机械传动系统的数学模型分别进行拉氏变换, 并将它们综合起来, 得到整个伺服进给系统的数学模型^[15]。

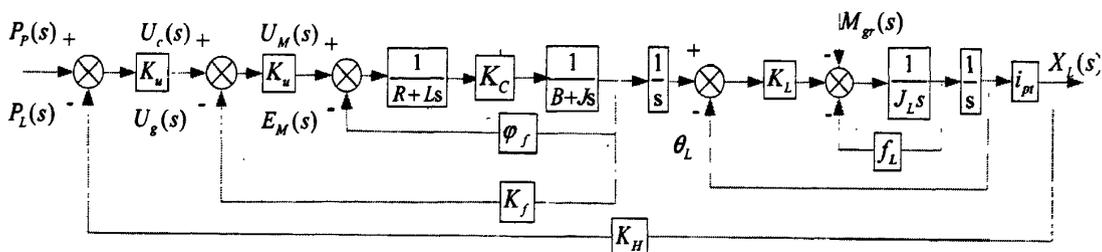


图6-8 伺服进给系统的数学模型

由上图我们可以求出输出 $X_L(s)$ 对输入 $P_p(s)$ 的伺服进给系统闭环函数为:

$$W(s) = \frac{X_L(s)}{P_p(s)} = \frac{K_u K_c K_a K_L i_{pi}}{As^5 + Cs^4 + Ds^3 + Es^2 + Fs + G} \quad (6-25)$$

式中 $A = J_L J_L$

$$D = RBJ_L + J_L K_c \phi_f + K_c K_a K_f J_L + JRf_L + LBf_L + JLK_L$$

$$E = f_L K_c \phi_f + RBf_L + K_c K_a K_f f_L + JRK_L$$

$$F = RBK_L + K_c \phi_f K_L + K_c K_a K_f K_L$$

$$G = K_u K_c K_a K_L K_N i_{pi}$$

6.7 本章小结

本章对伺服系统的组成结构, 交流伺服系统的组成环节进行了介绍, 应用数学建模方法对伺服驱动部分的主要环节进行分析并建立数学模型; 机械传动系统建模过程在一

定的条件下应用动力学原理完成, 并对其数学模型进行拉氏变换, 整理得出机械传动系统的标准传递函数; 最后综合伺服驱动和机械传动系统的数学模型建立出机床伺服进给系统的数学模型。

第七章 交流伺服进给系统仿真

7.1 交流伺服系统仿真模型建立

SIMULINK自1992年问世以来,很快在控制界有了广泛应用。目前在解决许多工程实际问题中都离不开计算机仿真, MATLAB/SIMULINK软件是一个可视化动态系统仿真环境,已经成为其中功能较强大的仿真软件之一。一方面,它是MATLAB的扩展,保留了所有MATLAB的函数和特性;另一方面,它又有可视化仿真和编程的特点。借助其可视化的优点,使用SIMULINK可以分析非常复杂的控制系统。

SIMULINK(Dynamic System Simulation)是MATLAB中的一种可视化仿真工具,是一种基于MATLAB的框图设计环境,是实现动态系统建模、仿真和分析的一个软件包,可对各种时变系统,例如通讯、信号处理,控制,视频处理等进行设计、仿真、执行和测试。SIMULINK可以用连续采样时间、离散采样时间或两种混合的采样时间进行建模,它也支持多速率系统,也就是系统中的不同部分具有不同的采样速率^[16]。

一般说来, SIMULINK的功能有两部分,其一是系统建模,其二是系统分析。当然对于控制系统的设计者来说,这两部分是一个连贯的整体。而仿真领域的重点是建立模型,即在模型建立完之后再加入控制算法对模型进行计算。SIMULINK提供了友好的图形界面(GUI),模型由模块组成的框图来表示。用户建模通过简单的单机和拖动鼠标的动作就能完成,使得建模就像用纸和笔来画一样容易。它比传统的仿真软件包显得更加直观、方便、灵活。

7.1.1 建模的主要模块

系统模型的建立主要是应用SIMULINK提供的大量仿真模块进行的,模块是动态仿真模型的基本单元。下面对模型建立过程中的常用模块做简要介绍^[30]:

(1)信号源模块组:主要提供系统的输入信号,本系统中采用这个模块组中的阶跃信号输入模块(Step)。

(2)连续模块组:系统建立采用了此模块组中的传递函数(Transfer Fcn)和积分器(Integrator)。传递函数是指在线性定常系统中,当初始条件为零时,系统输出的拉氏变换与输入的拉氏变换之比,从而以多项式的比值形式描述系统。积分器是连续动态系统最常用的元件,该模块实现对输入信号进行积分运算。

(3)数学运算模块组:SIMULINK中的数学运算模块的设计,将许多数学运算封装打包,实现了各种各样的数学函数运算。由于大量增益存在于交流伺服系统中,所以这个模块组中的增益函数模块(Gain)应用较多,它的输出信号等于输入信号乘以增益模块中

指定的数值。此外,求和模块(Sum)也是系统模型建立过程中应用也比较频繁,这个模块是将输入的多路信号进行求和或求差,然后计算出输出信号。

(4)输出模块组:这些模块的主要作用是显示计算结果。

7.2 工作台与电机参数计算

7.2.1 工作台参数计算

工作台伺服系统是由驱动系统与机械传动系统组成的一个高精度角度闭环系统,其输入为工业计算机给出的指令脉冲,输出为电动机的转角,再以光栅尺、脉冲编码器等组成检测反馈环节所实现的闭环控制下,电动机的转角将跟随输入指令变换。通过滚珠丝杠螺母副传动后,电动机的角位移被转化为所需的工作台的直线位移。

设工作台的最大进给力 $F_f = 2000N$, 工作台,质量 $100kg$, 工件与夹具的质量为 $100kg$ 。工作台行程为 $600mm$ 。丝杠直径 $d = 0.02m$, 丝杠导程 $P_h = 0.005m$, 丝杠总长 $l = 1.2m$, 伺服电机的最高转速 $n_{max} = 3000r/min$ 。伺服电机通过联轴器与丝杠直接连接,即 $i = 1$ 。电机的最高转速 $n_{max} = 3000r/min$, 则丝杠的最高转速为 $n_{max} = 3000r/min$ 。由公式 $P_h = \frac{1000v_{max}}{n_{max}}$ (P_h 为丝杠导程) 得到工作台快速进给的最高速度为^[30]:

$$v_{max} = \frac{P_h n_{max}}{1000} = \frac{5 \times 3000}{1000} = 15(m/min) \quad (7-1)$$

脉冲当量为 $0.002mm/脉冲$ 。伺服电机每转应发出的脉冲数达到

$$b = \frac{P_h}{\delta} i = \frac{5}{0.002} \times 1 = 2500 \quad (7-2)$$

丝杠的最大载荷,为切削时的最大进给力加摩擦力;最小载荷即摩擦力。已知最大进给力为 $F_f = 2000N$, 工作台加工工件与夹具的质量为 $100 + 100 = 200kg$, 粘塑导轨的摩擦因数为 0.04 , 故丝杠的最小载荷(即摩擦力)为

$$F_{min} = f_G = 0.04 \times 200 \times 9.8 = 78.4(N) \quad (7-3)$$

丝杠的最大载荷为

$$F_{max} = 2000 + 78.4 = 2078.4(N) \quad (7-4)$$

轴向的工作载荷(平均载荷):

$$F_m = \frac{2F_{max} + F_{min}}{3} = \frac{2 \times 2078.4 + 78.4}{3} \approx 1411.7(N) \quad (7-5)$$

其中, F_{max} 、 F_{min} 分别为丝杠最大、最小轴向载荷;当载荷按照单调式规律变化,各种转速使用机会相同时, $F_m = (2F_{max} + F_{min})/3$ 。

丝杠最高转速为 $3000r/min$, 取丝杠的最低转速为 0 , 则平均转速为

$n = (3000 + 0) / 2 = 1500 \text{ r/min}$ 。故丝杠工作寿命为

$$L_a = \frac{60nT}{10^6} = \frac{60 \times 1500 \times 15000}{10^6} = 135 \quad (7-6)$$

式中 L_a —工作寿命, 以 10^6 为 1 个单位;

n —丝杠转速, r/min ;

T —丝杠使用寿命, 对数控机床可取 $T=15000\text{h}$ 。

计算当量动载荷 C_m 为

$$C_m = \frac{F_m \sqrt[3]{L_a} K_o}{K_a} = \frac{1411.7 \times \sqrt[3]{135} \times 1.5}{1} \approx 10863 \text{ (N)} \quad (7-7)$$

式中 K_o —载荷性质系数, 无冲击取 $1 \sim 1.2$, 一般情况取 $1.2 \sim 1.5$, 有较大冲击振动时取 $1.5 \sim 2.5$, 这里取 1.5 ;

K_a —精度影响系数, 对于 1、2、3 级精度的滚珠丝杠 $K_a = 1$, 对于 4、5 级精度的滚珠丝杠取 $K_a = 0.9$, 这里取 $K_a = 1$;

丝杠直径为 20mm , 导程为 5mm 。取额定动载荷为 $C_a = 20000\text{N}$, 轴向刚度 $K_d = 230\text{N}/\mu\text{m}$ 。

预紧力 $F_p = C_a / 4 = 20000 / 4 = 5000\text{N}$ 。只要轴向载荷值不达到或不超过预紧力 F_p 的 3 倍, 就不必对预紧力提出额外的要求。

7.2.2 伺服电机相关参数确定

(1) 最大切削负载转矩计算

所选伺服电机的额定转矩应大于最大切削负载转矩。最大切削负载转矩 T 可根据下式计算, 即^[30]

$$T = \left(\frac{F_{\max} P_h}{2\pi\eta} + T_{PO} + T_{fo} \right) i = \frac{2078.4 \times 0.005}{2\pi \times 0.9} + 0.84 + 0.64 \approx 3.32 \text{ (N} \cdot \text{m)} \quad (7-8)$$

其中, 从前面的计算已知最大进给力 $F_{\max} = 2078.4\text{N}$, 丝杠导程 $P_h = 5\text{mm} = 0.005\text{m}$, 取预紧力 $F_p = 5000\text{N}$, 滚珠丝杠螺母副的机械效率 $\eta = 0.9$ 因滚珠丝杠预加载荷引起的附加摩擦力矩为

$$T_{PO} = \frac{F_p P_h}{29.8} = \frac{5000 \times 0.005}{29.8} \approx 0.84 \text{ (N} \cdot \text{m)} \quad (7-9)$$

查询机床所选轴承技术条件, 确定轴承的摩擦力矩 $T_{fo} = 0.64\text{N} \cdot \text{m}$ 。伺服电机与丝杠直接连接, 其传动比 $i = 1$ 。

(2) 负载惯量计算

1) 工件、夹具与工作台折算在电机轴上的惯量 J_1

工件夹具和工作台的最大质量 $m = 200\text{kg}$, 可按下式计算, 即

$$J_1 = m\left(\frac{v}{\omega}\right)^2 = m\left(\frac{P_h n}{2\pi n}\right)^2 = 200 \times \left(\frac{0.005}{2\pi}\right)^2 = 0.000127 \text{ (kg} \cdot \text{m}^2) \quad (7-10)$$

式中 v —工作台移动速度, m/s;

ω —伺服电机角速度, rad/s;

m —直线移动件工件、夹具和工作台的质量, kg。

2) 丝杠加在电机轴上的惯量 J_2

丝杠直径 $D_0 = 20\text{mm} = 0.02\text{m}$, 长度 $l = 1.2\text{m}$, 丝杠材料钢的密度 $\rho = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

根据下式计算, 丝杠加在电机轴上的惯量 J_2 为

$$J_2 = \frac{1}{32} \pi \rho l D_0^4 = \frac{1}{32} \pi \times 7.8 \times 10^3 \times 1.2 \times 0.02^4 = 0.000147 \text{ (kg} \cdot \text{m}^2) \quad (7-11)$$

(3) 联轴节加上锁紧螺母等的惯量 J_3

直接查询手册得:

$$J_3 = 0.001 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (7-12)$$

(4) 负载总惯量

$$J_r = J_1 + J_2 + J_3 = 0.000127 + 0.000147 + 0.001 = 0.001274 \text{ (kg} \cdot \text{m}^2) \quad (7-13)$$

7.3 伺服电机技术参数

伺服电机技术参数见表7-1。

表7-1伺服电机技术参数

额定输出功率 (W)	750
额定转矩 ($N \cdot m$)	2.4
最大转矩 ($N \cdot m$)	7.1
额定转速/最高转速 (rpm)	3000/4500
电机惯量 ($\times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)	1.51
变压器容量 (kVA)	1.3
额定电压 (V)	200
脉冲数 (p/r)	2500
分辨率	10000
电机转矩常数	0.25
阻尼系数	0.001
额定相电流 (A)	2.5
额定相电压 (V)	106
定子电阻 (Ω)	0.25
电枢电感 (H)	0.3

定子供电频率 (Hz)	200
极对数	4
转矩系数	4

7.4 仿真参数

通过7.2节中工作台、伺服电机相关参数计算和7.3节中伺服电机技术参数, 伺服系统数学模型中相关仿真参数确定如下:

位置放大器增益 K_u : 32;

速度放大器增益 K_v : 4;

绕组等效电阻 R : 0.25Ω ;

位置反馈增益 K_H : 32;

电机转动惯量 J : $1.51 \times 10^{-4} \text{kg} \cdot \text{m}^2$;

电枢电感 L : 0.3H;

转矩系数 K_c : 与电机极对数相等, 因为电机极对数为4, 则转矩系数也为4;

电机摩擦系数 B : 设为0;

机械传动部件折算到丝杠上的扭转刚度 K_L : $0.25 \text{N} \cdot \text{m} / \text{rad}$;

机械传动部件折算到丝杠上的转动惯量 J_L : 与负载惯量相等, 为 $0.001274 \text{kg} \cdot \text{m}^2$;

丝杠螺母副的传动比 i_{pt} : 由 $i_{pt} = \frac{5}{2 \times \pi} = 0.7958 \text{mm} / \text{rad}$;

速度反馈系数 K_f : 因速度环增益为 18Hz , 速度环积分时间常数为 31ms , 则

$$K_f = \frac{18 \times 1.51 \times 10^{-4} \times 0.031}{0.25} = 3.37 \times 10^{-5} \quad (7-14)$$

永磁体产生的恒定磁通或转子磁场的等效磁链 φ_f : 设为 0.1Wb ;

机械传动部件折算到丝杠上的粘性阻尼系数 f_L : 设为 $0.001 \text{s} \cdot \text{N} \cdot \text{m} / \text{rad}$ 。

7.5 仿真模型建立

整个交流伺服系统的数学模型主要由第六章中的伺服系统以及机械传动装置的数学模型组成, 下面以数学模型为依据, 建立SIMULINK系统仿真模型。

模型的构建与定义、模型的分析及修正使用SIMULINK的3大步骤。利用SIMULINK进行系统仿真的步骤是:

- (1) 启动SIMULINK, 打开SIMULINK模块库;
- (2) 打开空白模型窗口;
- (3) 建立SIMULINK仿真模型;
- (4) 设置仿真参数, 进行仿真;

(5) 输出仿真结果。

根据伺服进给系统的数学模型，并将7.4节中的仿真参数代入其中进行计算，在MATLAB软件中运用SIMULINK建立伺服系统的仿真模块，如图7-1所示：

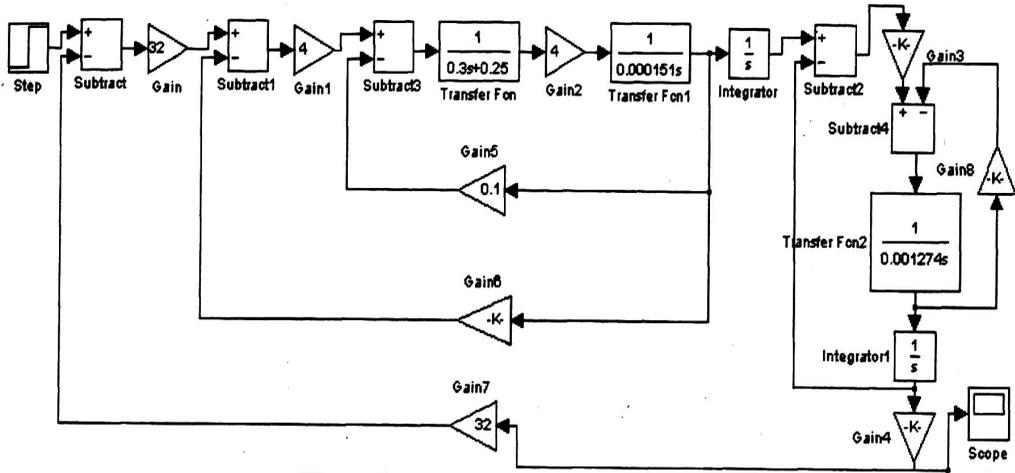


图 7-1 在 SIMULINK 环境下建立的系统模型

7.6 仿真结果与分析

运用SIMULINK软件将图7-1的系统模型进行仿真后得到系统阶跃响应图如图7-2所示。

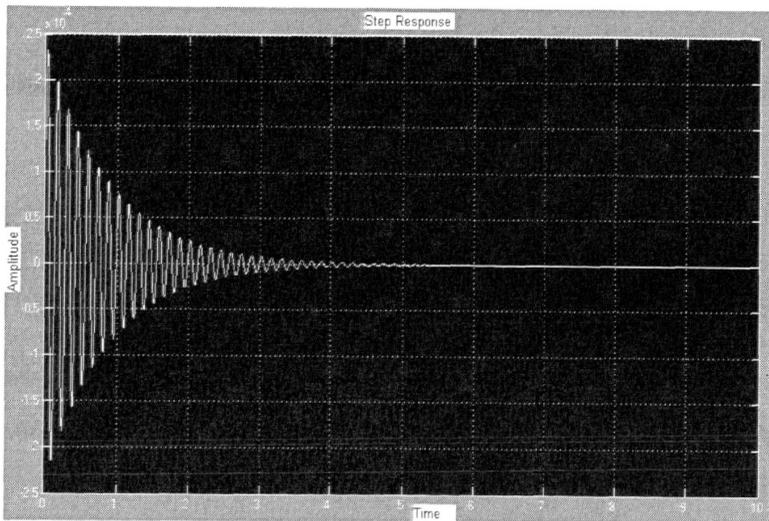


图 7-2 系统阶跃响应图

通过系统阶跃响应图可以看出，系统阶跃响应图振荡收敛逐渐趋于稳定。总体来说，系统稳定运行，具有较好的静态特性和动态特性。

7.7 本章小结

本章节通过参数计算确定出工作台、伺服电机相关参数，代入伺服系统数学模型中运用Matlab软件仿真得出交流进给伺服系统的阶跃响应图，验证伺服系统的正确性。

结 论

本文主要介绍了一种“PC+运动控制器”型交流伺服进给控制系统，采用基于 PCI 总线的 MPC2810 控制卡作为运动控制系统的开发平台，并利用 VC++对 MPC2810 运动控制函数库进行二次开发而编写出的面向对象的实时显示控制程序，从而通过 MPC2810 卡来实现对运动控制系统中试验台的精确调速和定位，解决了运动控制系统中控制精度低的问题。本论文主要完成了以下几方面的工作：

(1) 设计了一种交流伺服进给系统。该系统基于“PC+运动控制器”，主要由伺服驱动系统和机械传动系统构成。MPC2810 运动控制器接收到 PC 机的指令后，然后把脉冲信号传给交流伺服驱动器和伺服电机，光电编码器输出的脉冲信号反馈给速度环的输入端，再由光栅尺反馈的位移信号给运动控制卡，设计出一种新型的全闭环运动控制系统，能实现对工作台自动、高速和高精度的控制。

(2) 对系统进行了软件开发。运动控制器与 PC 机构成主从式控制结构，运动控制器完成运动控制的所有任务；PC 机负责管理人机交互界面和实时监控控制系统等方面的工作。MPC2810 运动控制器中具有功能强大、内容丰富的 Windows 动态链接库，利用 Visual C++6.0 方便地开发出了这套运动控制系统。应用结果表明，MPC2810 控制卡具有开发简单、运动可靠和控制方便等特点，能出色的完成运动控制的各个细节。

(3) 仿照机床动力学原理建立了包括伺服控制系统在内的试验台伺服进给系统的模型。

(4) 以该实验平台为对象，计算了伺服进给系统相关参数，对伺服进给系统运用 Matlab 软件进行 SIMULINK 建模并进行仿真，得出了系统阶跃响应图。通过系统阶跃响应图可以看出，系统阶跃响应图振荡收敛逐渐趋于稳定。

由于时间、条件、个人能力的限制，该课题的研究还存在一些不完善之处还有待进一步改进和研究：

- (1) 机械传动系统尚属于设计阶段；
- (2) 人机交互界面还有待进一步美化；
- (3) 在系统参数选取方面还不够准确影响到了系统的仿真；

(4) 因为试验平台实际运行环境比较复杂，所以关于系统的控制算法及其在实际应用的稳定性方面尚有待研究和实践检验。

致 谢

转眼间三年的硕士研究生学习生涯已接近尾声。而今回首，感慨万分之际，谨向给予我指导、帮助和关怀的所有人们致以衷心的感谢！

本论文在许明恒老师和高宏力老师的倾心指导下才得以顺利完成。从论文的开题到最终定稿，老师们给我提出了非常好的见解与学习方法。老师渊博的知识、严谨的治学态度，孜孜不倦的敬业精神以及对学生无微不至的关怀始终令我敬佩，使我在学术、专业技术和做人方面受益匪浅。谨在此论文完成之际，对两位老师表示深切的感激之情。

同时感谢实验室的各位同学在学习过程的帮助，帮助我解决了许多难题，使论文得以顺利完成。

最后，我要特别感谢我的父母，感谢他们这些年来给我的关怀，一直支持和鼓励着我，他们是我这些年来前进的动力。

参 考 文 献

- [1] 袁宏, 郭淑芳, 汪海英, 沙茂伟. 交流伺服系统的现状及发展趋势[J]. 沈阳工业大学学报. 1995, 17(02): 90-93
- [2] 金钰, 胡佑德, 李向春. 伺服系统设计指导[M]. 北京理工大学出版社, 2000: 20-30
- [3] 陈宝. 交流伺服系统的组成与发展[J]. 第十二届中国小电机技术研讨会论文集. 2007
- [4] 敖荣庆, 袁坤. 伺服系统[M]. 航空工业出版社, 2006: 30-40
- [5] 秦忆. 现代交流伺服系统[M]. 华中理工大学出版社, 1995: 20-25
- [6] 于东, 郭锐锋. 数控机床中的伺服系统[J]. 伺服控制. 2006, (01): 16-18
- [7] 张运芳. 交流永磁同步伺服系统研究[D]. 江苏大学. 2009: 35-40
- [8] 耿连发, 田立坚, 吴延忠. 交流伺服系统的发展概况[J]. 微电机. 1994, 27(4): 23-27
- [9] 施阳, 严卫生, 李俊等. MATLAB 语言精要及动态仿真工具 SIMULINK[M]. 西北工业大学出版社, 2001: 35-55
- [10] 王沫然. SIMULINK 4 建模及动态仿真[M]. 电子工业出版社, 2002: 60-77
- [11] 郭庆鼎, 王成元. 交流伺服系统[M]. 机械工业出版社, 1994: 23-44
- [12] 董玉红, 杨清梅. 机械工程控制基础[M]. 哈尔滨工业大学出版社, 2003: 43-56
- [13] 王德斌. 交流伺服进给系统及其数学模型的研究[J]. 机械制造与自动化. 2006, (01): 86-88
- [14] 王辉, 计时鸣, 汪小洪. CK6136 数控车床交流伺服进给系统的分析与建模[J]. 现代商贸工业. 2009, (02): 307-308
- [15] 舒志兵, 刘峻泉, 林锦国, 赵英凯. 闭环伺服系统的数学模型研究[J]. 系统仿真学报. 2004, 14(12): 1611-1613
- [16] 警斌, 朱真才, 魏明生. 交流伺服驱动系统动态建模及控制[J]. 中国机械工程. 2009, 20(8): 920-927.
- [17] 高文元, 卢晓光, 张克力, 刘尊鹏, 王鹏. 基于矢量控制的交流伺服进给系统建模[J]. 兰州理工大学学报. 2009, 35(02): 37-40
- [18] 郭庆鼎. 现代永磁电动机交流伺服系统[M]. 中国电力出版社, 2006: 55-59
- [19] 温熙森. 机械系统建模与动态分析[M]. 科学出版社, 2004: 23-44
- [20] 张海伟. 基于 X-Y 平台的数控伺服系统建模与仿真[D]. 西北农林科技大学. 2006: 20-30
- [21] 廖永忠. 基于 DSP 运动控制卡及控制算法的设计与研究[D]. 湖南师范大学硕士学位

论文. 2006:10-30

- [22] 黄永安, 马路, 刘慧敏. MATLAB7.0/SIMULINK6.0 建模仿真开发与高级工程应用[M]. 清华大学出版社, 2005: 12-44
- [23] 黄永安, 马路, 刘慧敏. MATLAB7.0/SIMULINK6.0 建模仿真开发与高级工程应用[M]. 清华大学出版社, 2005: 12-44
- [24] 黄永安, 马路, 刘慧敏. MATLAB7.0/SIMULINK6.0 建模仿真开发与高级工程应用[M]. 清华大学出版社, 2005: 12-44
- [25] 薛定宇, 陈阳泉. 基于 MATLAB/Simuhnk 的系统仿真技术与应用[M]. 清华大学出版社, 2002:33-44
- [26] 李琳. 基于 SIMULINK 的数控机床高阶伺服系统的建模与仿真[J]. 机械与电子. 2007, (09): 34-36
- [27] 何光东. 交流伺服控制技术研究[D]. 浙江大学博士学位论文. 1998:16-30
- [28] 付宝琴, 惠纪庄. 数控铣削伺服系统的仿真建模与研究[J]. 西安公路交通大学学报. 1997, (1): 56-57
- [29] 王爱玲, 张吉堂. 现代数控原理及控制系统[M]. 国防工业出版社, 2002: 68-74
- [30] 宋玉. 机床伺服控制性能及动态特性研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文. 2010: 60-70
- [31] 戴锋. Visual C++程序设计基础[M]. 清华大学出版社, 2001:44-56
- [32] 谢绪凯. 现代控制理论基础[M]. 辽宁人民出版社, 1985: 55-77
- [33] 李友善. 自动控制原理[M]. 国防工业出版社, 1980: 44-55
- [34] 刘坤, MATLAB 自动控制原理习题精解[M]. 国防工业出版社, 2004: 55-78
- [35] 杨叔子, 杨克冲. 机械工程控制基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005:44-56
- [36] 陈婵娟, 张航伟. 基于运动控制器的开放式数控系统[J]. 机械与电子. 2007, (01): 46-47
- [37] 孙鑫, 余安萍. VC++深入详解[M]. 电子工业出版社, 2006: 44-300
- [38] 现代实用机床设计手册编委会. 现代实用机床设计手册[M]. 机械工业出版社, 2006: 78-100
- [39] 机械设计手册编委会. 机械设计手册[M]. 机械工业出版社, 2004: 203-400
- [40] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 国防工业出版社, 1984: 77-100
- [41] 孔慧勇. 基于运动控制卡的全闭环控制系统研究[D]. 四川大学硕士学位论文. 2003: 55-60

攻读学位期间发表的学术论文

- [1] 邓 鹏, 许明恒, 高宏力, 叶 浩. 利用公法线长度选择变位系数新方法的研究[J]. 制造技术与机床. 2010, (09)
- [2] 张筱辰, 高宏力, 邓鹏, 郭亮. 基于 AMESim 和 SQP 算法的爬行焊接机温控系统优化设计[J]. 制造业自动化. 2010, (12)

参与过的项目:

- [1] 2009.7 ~2010.3 在四川德恩机械有限责任公司参与三级和二级减速机的设计。
- [2] 2010.3 ~2011.7 参与国家“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项子课题“故障预警和诊断技术”（项目编号 20092x04014-102-03）中关于交流伺服进给系统试验台的设计与仿真。