

摘 要

移动机器人运动控制系统是移动机器人的运动控制部件，对机器人的平稳运行起着重要的作用。随着新的控制算法的应用和电子技术的发展，移动机器人正朝着高速、高精度、开放化、智能化、网络化发展，对运动控制系统也提出了更高的要求。移动机器人要实现高速、高精度的位置控制和轨迹跟踪，必须依赖先进的控制策略和优良的运动控制系统。

运动控制的最有效的方式就是对运动源的控制，电动机是最常用的运动源。因此，一般通过对电动机的控制来实现移动机器人的运动控制。根据运动控制系统的核心部件和控制要求的不同，本文介绍了运动控制系统常用的六种实现方案，根据它们的优点与缺点，选定以 DSP(数字信号处理)控制器为核心芯片进行运动控制系统的设计。论文中研究了基于 DSP 的移动机器人运动控制系统的具体实现方案，对系统的硬件结构、控制软件及速度算法进行了分析与设计。

首先，本文设计了运动控制系统的结构及主要的硬件电路。论文介绍了移动机器人控制系统的组成与行驶机构，详细叙述了运动控制系统的总体设计、DSP 功能分析以及驱动电机选型；讨论了运动控制系统的功能结构，针对主要的电路结构进行了详细设计和分析，其中包括复位和时钟电路、串行通信接口、ADC 电路、电机驱动、信号隔离与反馈检测等模块。

其次，本文提出了运动控制系统的控制软件和编程思路。论文中介绍了软件控制的总体结构与功能模块，然后详细介绍了各个模块的程序编写与必要的 DSP 寄存器的设置，包括脉冲输出与转向控制、通讯接口与数据校验、模数转换、QEP 脉冲计数、主程序及 FLASH 引导程序，并介绍了相应的程序流程图。

最后，为提高步进电机的控制性能，本文改进了两相混合式步进电机的闭环控制方法。本部分讨论了步进电机的升降速曲线，并根据其数学模型设计了 PID 控制器、模糊控制器和自整定模糊 PID 控制器，介绍了 PID 控制器的实现程序，对模糊控制规则表、PID 参数选择和仿真结果进行了分析。

关键词： 运动控制系统，DSP，步进电机，速度控制

ABSTRACT

As the actuator of robot system, the motion control system effects the stabilization of the robot evidently. With the advancement of control theories and the development of electronic technologies, the robot system is developed with high speed, high accurateness, open-architecture, and intelligence. For the high speed and high accurate location-control and trajectory tracking, the mobile robot system must rely on advanced motion control theory and fine motion control structure.

The most efficient method for motion control is to control motion source, in which the motor is just the most common one. Therefore the control of mobile robots indirectly is often realized by control of the motors. According to the control requests and the kernel components in control system of mobile robot, six schemes are compared in this thesis. And then on the basis of the advantages and the disadvantages of six schemes, the motion control system with DSP (Digital Signal Processing) controller as the kernel chip is chosen. Based on TMS320LF2407 DSP controller, the particular scheme of the motion control robot system, the hardware, the software, and speed algorithm of the control system, are analyzed and designed in details.

First at all, the structures and the mostly hard components of this motion control system are designed. The constitution and structures of the whole system are analyzed, and the function and the hardware structures of DSP are presented, and so on. The main content includes: the choice of CPU, motor drive control, serial communication interface circuits, ADC, signal segregate circuits and so on.

Secondly, the thesis is also concerned with the design of control software of the system according to the control requirements. This part analyzes the software structures, and then designs each program module that deal with pulse output and veer control, serial communication and verify, A/D transform program, main program, and Flash boot program.

Finally, in order to improve the controlling property of the stepping motor, the closed loop control methods of the stepping motor have been discussed. In this part, the rising-and-falling curve of speed and the mathematic model of the stepping motor have been introduced. And then the selection of the parameters of the PID controller and the design of the fuzzy controller are described, then the realization programs and the simulation experiment of the fuzzy controller are studied in details. The principle of fuzzy-PID controller with parameters self-adjusting is introduced, and the simulations are also presented.

KEY WORDS: motion control system, DSP, stepping motor, speed control

原创性声明

本人声明，所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了论文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中南大学或其他单位的学位或证书而使用过的材料。与我共同工作的同志对本研究所作的贡献均已在论文中作了明确的说明。

作者签名：田波 日期：04年4月22日

关于学位论文使用授权说明

本人了解中南大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以采用复印、缩印或其它手段保存学位论文；学校可根据国家或湖南省有关部门规定送交学位论文。

作者签名：田波 导师签名：蔡自兴 日期：2004年4月22日

第一章 绪论

1.1 课题的研究背景

本课题“基于 DSP 的机器人运动控制系统研究”来源于国家自然科学基金委员会重点项目：“未知环境下机器人导航控制的理论与方法研究”，课题编号为：60234030，本课题由中南大学、国防科技大学和吉林大学合作研究。

机器人近年来成为国际机器人学术界的热门研究领域，这是因为它在工业、农业、医学和人类生活的各个方面显示了越来越广泛的应用前景。20 世纪 90 年代以来，以研制高水平的环境信息传感器和信息处理技术，高适应性的机器人控制技术，真实环境下的规划技术为标志，开展了机器人更高层次的研究。目前，机器人特别是自主机器人已成为机器人技术中一个十分活跃的研究领域。

在机器人导航控制理论和方法的研究中，确定性环境的导航控制方法已取得了大量的研究和应用成果。对未知环境中的导航控制也已开展了一些研究，并提出了若干方法，但尚未形成统一和完善的体系结构，还有许多关键理论和技术问题有待解决和完善。这些问题主要包括环境建模、定位、导航控制器的学习和优化、故障诊断、在线运动规划与控制等。未知环境中的机器人只具有较少的先验知识，其导航控制方法涉及环境认知、优化决策、知识表示与获取等多项关键问题。未知环境中的机器人导航控制理论和方法的研究目的是在机器学习、环境认知、在线规划、运动控制等方面的理论和方法上有突破性进展，推动认知科学、模式识别、非线性控制等学科的前沿问题研究，提供新的设计理论和技术^{[1][2]}。

本论文的研究目的在于为“未知环境下机器人导航控制的理论与方法研究”提供一个可靠的实验平台，并对复杂环境下机器人运动控制系统的结构与速度控制方法进行研究。机器人运动控制系统是机器人系统的运动控制部件，对系统平稳运行起着重要作用。运动控制的实质是以给定值为参考，以传感器信息作为反馈，对希望路径进行跟踪控制。机器人系统正朝着高速、高精度、开放化、智能化、网络化发展，对运动控制系统也提出了更高的要求。机器人要实现高速、高精度的位置控制和轨迹跟踪，必须依赖先进的控制策略和可靠、优良的运动控制系统。近年来，许多新的算法被研究并应用于运动控制中，如预测控制、鲁棒控制、自适应控制、学习控制及神经网络控制等，这些复杂的算法必须在高性能的处理器中运行才能实现系统的实时控制，因此以高性能处理器为核心的运动控制系统是运动控制系统的发展趋势。因此，把人工智能引入机器人控制，将先进电子设计技术应用于机器人的高性能计算机控制系统显得极为重要。

1.2 移动机器人的研究概况

移动机器人是一类能够通过传感器感知环境和自身状态, 实现在有障碍物的环境中面向目标自主运动, 从而完成一定功能的机器人系统。根据活动范围和工作环境的不同, 可分为陆地、水下和空中移动机器人; 根据平台载体的不同, 可分为轮式、履带式 and 步足式移动机器人等类型; 根据执行任务的智能水平, 又可分为自主式、半自主式和遥控式移动机器人。理想的自主移动机器人可以不需人的干预在各种环境中自主完成规定任务, 具有较高的智能水平, 但在目前全自主移动机器人还大多处于实验阶段, 进入实用的多为半自主移动机器人, 通过人的干预在特定环境中执行各种任务, 而遥控机器人则完全离不开人的干预^[1]。

移动机器人技术研究综合了多学科领域的知识, 关键技术可分为: 路径规划、导航定位、路径跟踪与运动控制技术^[4]。路径规划又可分为全局和局部路径规划, 全局路径规划是根据移动机器人总体任务进行路径规划, 将总体路径任务分解, 并建立全局地形数据库; 局部路径规划是根据全局规划分解的子任务, 结合移动机器人当前状态信息, 实时规划可行路径。导航定位技术确定移动机器人在全局地图中的位置, 并实时得到机器人与路径跟踪的相对位置关系, 其关键技术是多传感器信息处理与数据融合技术。路径跟踪与运动控制技术的任务是控制移动机器人跟踪局部规划给出的路径, 结合导航定位系统得到机器人本身状态信息与道路信息, 完成航向和速度控制。移动机器人的路径规划、导航控制以及路径跟踪与运动控制技术是相互关联的, 任何一个系统的不完善都会导致整体性能的下降。

移动机器人技术的发展经过了较长的历程^[5]。1962年, 美国俄亥俄州立大学开始进行车辆自动驾驶控制技术的研究。同时, 美国的麻省理工学院、斯坦福研究院(SRI)以及英国PATH(Program on Advanced Technology for the Highway)研究实验室、日本 MITI 的机械工程实验室等研究机构也进入到这一领域。到了八十年代, 众多的国家开始研制自主移动机器人, 而且发展迅速, 有不少研究机构取得了很多有意义的研究成果, 其中较为著名的有美国的 NIST、卡内基-梅隆大学、德国国防军大学、日本的 Tsugawa 等。九十年代至今, 有更多的国家加入到智能移动机器人技术的研究, 主要研究热点是将各种智能控制方法应用到移动机器人的控制。典型的移动机器人有美国喷气推进实验室(JPL)研制的索杰纳(Sojourner)、Athena、Nanorover, 卡内基-梅隆大学研制的流浪者(Nomad)等。

我国自“八五”期间开始进入这一研究领域, 并在国家 863 计划中予以重点支持。较为全面对路径规划、视觉导航、信息融合、自动驾驶等一些基本的智能机器人技术做了探索, 所形成的一些关键技术成果也在其他领域得到应用。我国在机器人技术与自动化工艺装备等方面已取得了突破性进展, 缩短了同发达国家的差距, 但是在机器人的核心及关键技术的原创性研究、高性能关键工艺装备的自主设计和制造能力、高可靠性基础功能部件的批量生产应用等方面, 同发达国家相比, 我国仍存在较大的差距^[6]。

1.3 移动机器人的运动控制

1.3.1 运动控制概述

动力和运动是可以相互转换的,从这个意义上讲,电动机是最常用的运动源。运动控制的最有效的方式就是对运动源的控制。因此,一般通过对电机的控制来实现系统的运动控制^[7]。在运动控制系统或电机控制系统中,对电机的控制可分为两类:

(1)简单控制,是指对电机进行启动、制动、正反转控制和顺序控制。这类控制可通过继电器、可编程控制器和开关元件来实现。

(2)复杂控制,是指对电机的转速、转角、转矩、电压、电流和功率等进行控制,这种控制的精度要求非常高。

过去,对电机的简单控制应用比较多,但随着电子技术和自动化水平的提高,人们对电机的复杂控制逐渐成为主要的控制方式,应用领域不断扩大。例如:军事和宇航方面的雷达天线、火炮瞄准、惯性导航、卫星姿态的控制,工业方面的各种加工机械、数控机床、工业机器人的控制,计算机和办公设备中的磁盘驱动器、光盘驱动器、绘图仪、打印机、复印机的控制,音像和家用电器中数码相机、洗衣机、空调器的控制等。

电机控制技术的发展得力于微电子技术、电力电子技术、传感器技术、自动控制技术和微机应用技术的最新发展成就,采用微处理器、FPGA/CPLD、通用计算机、DSP 控制器等现代控制手段构成的数字控制系统已成为主流控制方法。随着时代的发展,各种电机的控制技术和微电子技术、电力电子技术的结合正使其发展成为一门新的技术,即运动控制技术。由于有微处理器和传感器作为新一代运动控制系统的组成部分,所以这种运动控制系统又称为智能运动控制系统。应用先进的控制算法,开发全数字化的智能运动控制系统将成为新一代运动控制系统设计的发展趋势。

移动机器人的控制系统是机器人系统的执行机构,对系统平稳运行起着重要作用,有时也可作为一个简单的控制器^[3]。构成机器人运动控制系统的要素有:计算机硬件系统及控制软件、输入/输出设备、驱动器、传感器系统,它们之间的关系如图 1-1 所示^[8]。

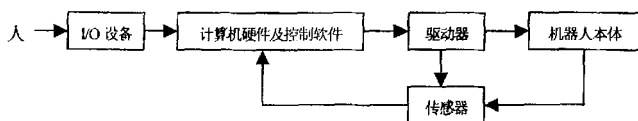


图 1-1 机器人控制系统构成要素

1.3.2 几种运动控制系统实现方法的比较

目前,一个运动控制系统或电机控制系统的实现方法主要有以下几种^[7]:

(1)以模拟电路硬接线方式建立的运动控制系统。早期的运动控制系统一般是采用运算放大器等分立元件以硬接线方式组成的模拟控制系统,其优点在于:通过对输入信号的实时处理,可实现系统的高速控制;由于硬接线方式可以实现无限的采样频率,因此控制器

的精度较高而且具有较大的宽度。

然而，与数字系统相比，其缺点也是很明显的：器件老化和环境温度变化对构成系统的元器件的参数影响很大；构成模拟系统所需的元器件较多，增加了系统的复杂性，也使系统的可靠性降低；由于系统采用硬接线，其升级和功能修改几乎是不可能的；受系统规模的限制，很难实现运算量大、精度高、性能更先进的复杂控制算法。这些缺陷使它很难应用于一些功能要求比较高的场合。

(2) 以微控制器为核心的运动控制系统。利用微控制器所构成的系统与模拟电路相比具有以下优点：绝大多数控制逻辑由软件实现，电路变得简单；微控制器具有更强的逻辑功能，运算速度快、精度高、具有大容量的存储器，因此有能力实现较为复杂的算法；微控制器的控制方式主要由软件实现，因此修改控制规律时，仅需对软件进行修改；无零点漂移，控制精度高；可提供人机界面，实现多机联网工作。

然而，由于微控制器一般采用 Von-Neumann 总线结构，处理速度和能力有限，软件编程难度较大，且一般芯片集成度较低，不具备运动控制系统的专用外设。因此，基于微控制器构成的系统仍需较多的元器件，这增加了系统电路的复杂性，降低了可靠性，也难以满足运算量较大的实时信号处理的需要，难以实现控制算法。

(3) 在通用计算机上用软件实现运动控制策略。在通用计算机上，利用高级语言编制相关的控制软件，配合驱动电路板、信号交换接口，就可以构成一个运动控制系统。这种实现方法利用计算机的高速度、强大的运算能力和方便的编程环境，可以实现高性能、高精度、复杂的控制算法，而且软件的修改也很方便。但是，通用计算机缺点在于系统体积大，难以应用于工业现场，而且难以实现实时性要求较高的信号处理算法。一般来说，这种系统实现方法可用于控制软件的仿真研究或用作上位机，与下位机的实时系统一起构成两级或多级运动控制系统。

(4) 利用专用芯片实现的运动控制。为简化电机模拟控制系统电路，同时保持系统的快速响应能力，一些公司推出了专用电机控制芯片，如 TI 公司的 UCC3626、UCC2626 等^[9]。利用专用电机控制芯片构成的运动控制系统保持了模拟系统和以微控制器为核心的运动控制系统两种实现方式的长处，具有速度快、系统集成度高、使用元器件少、可靠性好等优点；同时，专用电机控制芯片的价格便宜，进一步降低了系统成本，因此这种实现方式广泛应用于精度较低和成本敏感场合。

然而，受专用电机控制芯片本身的限制，其缺点主要包括：软件算法固化在芯片内部，虽然可以保证较高的响应速度，但降低了系统灵活性，扩展性较差；受芯片制造工艺限制，其算法较为简单，控制精度也较低；用户不能对芯片编程，不便对系统升级。

(5) 以可编程逻辑器件为核心的运动控制系统。由于 FPGA/CPLD 等可编程器件的发展，人们可以利用它们的系统开发软件或 VHDL 等开发语言，通过软件编程实现运动控算法，然后将这些算法下载到相应的可编程逻辑器件中，从而以硬件方式实现最终的运动控制系统。这种系统优点主要有：系统的主要功能在单片 FPGA/CPLD 中实现，减少了元器件个数，缩

小了系统体积；具有良好的扩展性和可维护性，通过修改软件并重新下载到目标板上的相关器件中，就可以对系统的升级；系统以硬件实现，响应速度快，可实现并行处理；开发工具齐全，通用性强。然而，这种系统实现方法的成本较高。控制算法越复杂，对可编程逻辑器件的集成度要求越高，芯片价格越昂贵。因此，考虑到系统成本，一般使用可编程逻辑器件实现较为简单的运动控制系统。

(6)以可编程 DSP 控制器为核心构成运动控制系统。DSP 属于精简指令集计算机，增强型哈佛结构，具有独立的程序存储空间和数据存储空间，运算速度极快(超过 20MIPS)为系统实时性提供了有力保障，也使复杂算法的实现成为可能，特别是面向电机控制应用的 DSP，它通过把一个高性能的 DSP 内核和常用外围设备集成为一个芯片的方法，将 DSP 的高速运算特性和优化的控制特性结合起来，成为运动控制系统核心芯片的最佳选择。基于 DSP 控制器的运动控制系统实际上是一个单片系统，因为整个电机控制所需的各种功能都可以用 DSP 控制器来实现，因此可以大幅度减小系统体积，减少外部器件的个数，增加系统可靠性。另外，由于各种功能都通过软件实现，系统升级容易，扩展性和可维护性都很好。同时，DSP 控制器的高性能使最终系统既能满足要求比较低的系统，也可以满足对性能和精度要求较高的场合需要。

通过以上比较，可以得到以下结论：

(1)基于 DSP 控制器的运动控制系统可满足任意场合的需要，将是运动控制系统实现技术的发展方向。

(2)虽然采用一些新型微控制器可以实现一些功能复杂、要求较高的运动控制系统，但是与同样性能的 DSP 控制器相比，这些新型微控制器成本较高。

(3)在一些简单、性能要求不高的场合，可以采用专用控制芯片、微控制器、可编程逻辑器件等实现运动控制系统。在一些大型系统中，可考虑采用通用计算机、工业计算机来构成运动控制系统。

(4)多种实现方法的互相配合使用，可以达到更好的效果和性能价格比。

1.3.3 运动控制系统的设计要求

移动机器人运动控制系统的设计主要包括系统的功能和结构设计，功能设计主要完成控制功能和算法的软件设计，而结构设计是功能在硬件上的实现^[10]。根据所面向的任务和环境不同，对移动机器人运动控制系统的设计也不同。目前机器人运动控制系统存在主要问题有：系统局限于专用微处理器、专用机器人语言，开放性差^[11]；软件结构依赖于微处理器硬件，难以在不同系统间移植；扩展性差^[12]。针对这些不足，进行机器人运动控制系统设计时应考虑以下要求：

(1)开放式系统结构。采用开放式软件、硬件结构，可以根据需要方便扩充功能，使其适用于不同目的的科研需求^{[13][14]}。

(2)合理的模块化设计。硬件根据系统要求和电气特性进行模块化设计，不仅方便安装

和维护,而且提高系统的可靠性;软件按功能分成不同模块,便于修改、添加。

(3)实时性、多任务要求。控制器必须能在确定时间内完成对外部中断的处理,并且可以多个任务同时进行^[15]。

(4)网络通信功能,便于资源共享和多机器人协同。

(5)具有一定智能,能根据实际情况判断和决策,如给定速度突变或在合理范围之外时的处理、对故障的自动诊断等^[1]。

1.4 DSP 控制系统

1.4.1 DSP 控制器概述

DSP 芯片作为可编程超大规模集成电路(VLSI)器件,集实时处理和控制器外设于一身,精度高,体积小,运算速度快,同时具有多级流水线操作,通过可下载的软件或内部硬件来实现复杂的数字信号处理功能,容易实现各种复杂算法。其主要特点如下^{[7][16]}:

(1)采用哈佛结构或改进的哈佛结构。早期的微处理器内部多采用 Von-Neumann 结构,片内程序空间和数据空间统一编址,使用同一总线。在高速运算时,不但不能同时取指令和取操作数,而且还会造成传输通道的瓶颈现象。DSP 芯片一般采用哈佛结构或改进的哈佛结构,这是一种并行体系结构,最大特点就是芯片具有独立的数据和程序存储空间,有独立的数据总线和程序总线,每个存储器单独编址、独立访问,从而提高了数据吞吐率和系统运算速度。与哈佛结构相配合,许多 DSP 芯片内部采用多总线结构,从而保证了一个机器周期内对数据和程序空间的多次访问。

(2)专用的硬件乘法器。在数字信号处理算法中,数量最多的运算类型就是乘法和加法。在通用的微处理器中,乘法一般由软件实现,需要多个指令周期来完成,这就限制了算法的执行速度。在 DSP 芯片中,一般有专用硬件乘法器,使得一次或多次乘法运算可在一个指令周期内完成,从而极大提高了 DSP 芯片的运算能力和速度。

(3)多个功能单元和片内硬件配置。多数 DSP 芯片内部设置了多个并行操作的功能单元,这些单元的并行操作提高了程序的执行速度。如:在不增加附加操作时间的前提下对操作数和操作结果进行任意移位,多数 DSP 支持在一个周期内完成一次加法和一次乘法操作。为更好的实现实时控制,DSP 芯片内部还集成了一些功能外设,如:通用串行口、主机接口、事件管理器、DMA 控制器、CAN 控制器、软件等待状态发生器、锁相环电路、A/D 转换模块以及 JTAG 测试仿真接口等,使其功能更完善,可靠性更高。

(4)快速的指令系统。改进的哈佛结构、专用硬件乘法器、流水线操作、多个并行功能单元、专用的特殊指令集,再配合现代集成电路的优化设计工艺,从而使 DSP 芯片的单指令周期下降到 50ns 以下。在 DSP 芯片内部,采用了多级流水线操作,可同时并行处理 2~4 条指令,增加了 CPU 的处理能力,把指令周期减少到最小值。

(5)片内存储器。由于 DSP 芯片是数据密集型应用,因此存储器的访问速度对处理器的性能影响很大。DSP 算法的特点就是大量的重复运算,其程序一般较为短小,存放在片内可以减少指令的传输时间。片内存储器虽然不可能具有很大的容量,但由于不存在访问外部存储器所带来的总线竞争和速度匹配问题,因此访问速度很快,可以多个存储器块并行访问,有效缓解芯片外部总线接口的压力。

(6)专用寻址单元。DSP 芯片是数据密集型应用,伴随着频繁的数据访问次数,数据地址的计算时间也线性增长,有时计算地址的时间比实际的算术操作时间还长。因此,DSP 芯片一般都有支持地址运算的地址产生器,不在额外占用 CPU 的计算时间。

按照 DSP 芯片所支持的数据类型的不同可分为定点和浮点 DSP 芯片。定点 DSP 芯片在进行算术运算时,使用的是小数点位置固定的有符号数和无符号数,在硬件结构上比浮点器件简单,具有价格低、速度快等特点,但是受字长的限制,其运算精度较低、动态范围小。定点 DSP 芯片主要有 Motorola 公司的 MC56000 系列,AD 公司的 ADSP21xx 系列,TI 公司的 TMS320C1x/C2x/C5x/C2xx/C24x/C24xx/C28x/C54x/C55x/C62x/C64x,等。浮点 DSP 芯片在进行运算时,使用的带有指数的小数,小数点的位置随着具体数据的不同进行浮动。浮点 DSP 芯片的优点是动态范围大、运算精度高、不需进行定标和考虑字长,在性能要求高的实时信号处理场合有着广泛的应用。但是,浮点芯片的成本高、功耗大、速度较慢。浮点芯片主要有 Motorola 公司的 MC96000 系列,AD 公司的 ADSP21xx 系列,TI 公司的 TMS320C3x/C4x/C8x/C67x 等。

1.4.2 TMS320x24x DSP 控制器概述

TMS320x24x 系列 DSP 是美国德州仪器(Texas Instrument, TI)公司推出的面向数字电机控制、嵌入式控制系统和数字控制系统开发的新型可编程 DSP 芯片。从 TI 公司推出第一片 DSP 控制器以来,整个 x24x 系列已经拥有二十多个产品型号。

x24x 系列 DSP 控制器将一个高性能的 16 位、定点、低功耗的 DSP 核 C2xLP 和许多功能外设集成在单芯片上,提供了较高的集成度和较强的运算能力。其共同特点有:

(1) DSP 控制器的 CPU 内包含 32 位中央算术逻辑单元、32 位累加器、16×16 并行硬件乘法器,并带有 32 结果寄存器、3 个可定标移位器和 8 个辅助寄存器。

(2) 一般带有 544 字 DARAM、16K 字程序 ROM 或 FLASH EEPROM,最大可寻址空间为 224K 字,带有软件等待状态产生器的外部存储器接口。

(3) 4 级流水线、8 级硬件堆栈、6 个外部中断,单指令周期小于 50ns。

(4) 源代码与 C1x/C2x/C2xx/C5x 系列 DSP 芯片兼容,具有单周期乘加、单指令重复、存储器块移动指令,支持位反寻址和索引寻址。

(5) 采用静态 CMOS 工艺技术,4 种低功耗操作模式,多种封装形式。

(6) 片上集成事件管理器、ADC、28 个可编程通用 I/O 引脚,具有定时中断的看门狗电路、SCI、SPI 等功能外设。

x24x 系列 DSP 控制器面向数字控制应用场合,特别是面向运动控制系统进行了优化,与具有相同外设集成度的微控制器相比,它具有更高的处理能力和更快的速度(20~40MIPS),同时片上集成了 PWM 产生电路、多通道 A/D 转换电路、CAN 控制器模块、串行通信接口电路、定时器、事件捕捉、锁相环时钟产生电路等外设和大容量的片内存储资源,这种强大的处理能力和专用外设的组合使所实现的控制系统效率更高、运行更可靠、能耗更低。由于 x24x 系列 DSP 控制器具有很高的可用计算带宽,因此可以容易的处理一些复杂的控制算法,如 Kalman 滤波、功率因素校正、FFT 算法以及矢量变换信号处理任务,而这些算法对于实现那些复杂的电机功能来说是非常必要的。这种优化大大简化了目标系统的结构,节省了目标系统的成本,使得 x24x 系列 DSP 控制器可用于实现多种电机的精确控制,而不必像传统的微处理器那样使用查表法来得到一个近似值。其字长一般为 16 位,算术运算单元和累加器一般为 32 位,内部的 3 个硬件移位器可独立地对数据进行定标,从而进一步降低运算过程中的量化误差和截尾误差,也提高了系统的精度。

1.4.3 DSP 控制系统的结构

根据文献[17],一个典型的 DSP 系统如图 1-2 所示。输入信号首先进行带限滤波和抽样,然后进行 A/D 变换将信号转换成数字比特流。DSP 芯片对输入的数字信号进行某种形式的处理,如进行一系列的乘累加操作。最后,经过处理后的数字样值再经 D/A 变换转换为模拟样值,之后再经内插和平滑滤波就可得到连续的模拟波形。

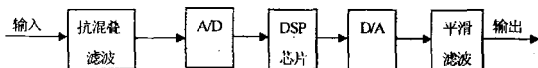


图 1-2 典型的 DSP 系统

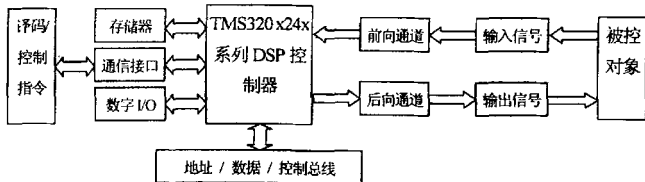


图 1-3 DSP 控制系统一般结构

DSP 控制器实际上就是一个具有 DSP 内核的高速多功能单片机(或微控制器),因此基于 x24x 系列 DSP 控制器开发的运动控制系统在结构上也与一般单片机(或微控制器)系统类似。将微控制器系统进行扩展,可以得到图 1-3 所示的典型 DSP 控制系统。图中,输入信号可以是各种被控对象发出的电、物理、化学、模拟或数字信号。

DSP 控制系统以数字信号处理为基础,因此具有数字处理的全部优点,如:接口方便、编程方便、稳定性好、精度高、可重复性好、集成方便。DSP 可以在高级算法的实时应用上改善控制系统的性能,这些算法(包括自适应、多变量寻优、学习、自校正、神经网络、

遗传算法和模糊逻辑等)都需要由 DSP 的高速和高性能来实现。当然, DSP 系统也存在一定的缺点。例如:对于简单的信号处理任务,如与模拟交换线的电话接口,若采用 DSP 则使成本增加; DSP 系统中的高速时钟可能带来高频干扰和电磁泄漏等问题,而且 DSP 系统消耗的功率也较大。

随着复杂甚至未知环境下机器人研究的深入,对运动控制系统的高速高精度要求越来越高。以前的运动控制系统大多是基于单片机或微控制器的,不能满足复杂而先进的控制算法的需要,而 DSP 由于其强大的运算能力、良好的 I/O 操作、极高的处理速度及优良的实时控制性能,在数字控制系统中具有广泛的应用前景和优势,选择 DSP 作为运动控制系统的核心已成为必然。

1.5 步进电机的控制

步进电机(Stepping Motor)于 1920 年诞生,仅仅为了满足“可立即转动及停止”和“能快速正确到达目的位置”两项简单需求。由于微电子技术和控制技术的迅速发展,不仅可以执行数位控制(脉冲控制),而且能精确定位控制,广泛应用于各种不同的领域。

步进电机的设计思想使它开环运行的精度高于通常电机,其运行速度与控制脉冲频率是严格的正比关系,转过的角度与控制脉冲的个数是严格的正比关系。组成步进电机的开环系统很简单,只需要环形分配和功率模块就可以了,这两者一般集成于电机驱动器内。振荡是步进电机开环控制的主要问题,其相关问题一直是研究重点^{[18][19]},振荡是与电机-驱动器系统的机电时间常数密切相关的。在电机轴上加装机械阻尼装置可以改变电机的时间常数,也可以改善电机系统的阻尼性能,但同时会对电机的输出力矩有影响。在电机驱动回路加入电阻与绕组串联,减小电路时间常数,加快电流响应速度,提高电机控制性能,常用方式是并联的电阻电容与绕组串联。混合式步进电机的不稳定性与电机绕组电流的谐波幅值直接相关,在绕组中适当加入低频分量,即幅值调制和频率调制,可以改善电机的振荡问题^[20]。随着应用的深入,步进电机驱动电路的结构日益规范,出现了很多专用于开环驱动芯片,针对环形分配电路的分析、优化也有所进展^[21],这些都使开环驱动电路日益可靠简单。

从系统结构上,步进电机的闭环控制可以分为两类。一类以现有的驱动器开环控制为基础,加上控制器和位置传感器构成的闭环控制,系统中控制器作用于驱动器,一个脉冲对应电机转过一步。这类系统的分析通常假设磁场线性,推导出驱动器与步进电机组成的系统的数学模型,进一步得到最优超前角用于控制^[22]。另一类是完全的闭环控制,即由控制器直接控制绕组,可以达到更高的性能。这类控制的设计是基于步进电机的瞬时转矩表达式,以电流控制为手段,转矩控制为目的^[23]。

智能控制和矢量控制也进入到了步进电机控制领域。智能控制可以利用专家的经验形

成控制规则,以较低的成本实现控制,但由于步进电机的非线性严重,目前很难实现较高的控制性能^[24]。矢量控制可以实现电机转矩的高效控制,但混合式步进电机内部磁场复杂,不仅有主电磁转矩,还有磁阻转矩,非线性更严重,矢量控制实现较为复杂^[25]。

本系统采用闭环控制的第一类方法,在原开环控制基础上,通过在前轮上加装光电编码器,与光纤陀螺仪和倾角传感器等导航定位设备构成闭环控制,利用各项反馈信息实时调整步进电机的转动角度。图 1-4 表示了本系统的电机控制结构框图,为了实现期望的转速和位置,需要利用光电编码器对电机进行检测,并且变成运动控制系统的输入量,然后通过控制运算调整下次的输出控制量。

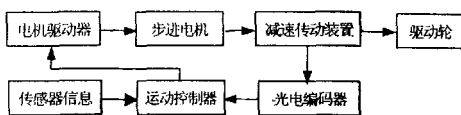


图 1-4 电机控制结构图

1.6 本论文的主要内容

本课题对移动机器人的运动控制系统的硬件结构、控制软件及控制策略做了较为深入的研究,目的在于开发一种基于 DSP 控制器的运动控制系统,运用于移动机器人控制,使该系统具有可靠和开放性的结构。该控制系统采用 TI 公司 TMS320LF2407 DSP 作为处理器,利用步进电机作为驱动装置,DSP 控制器从上位机接收的指令,根据算法控制步进电机转动,完成机器人的不同运动。论文的主要内容包括以下几个方面:

第一章主要是研究背景介绍,包括本课题的来源和研究意义、运动控制系统概况和 DSP 控制器基本功能等。

第二章主要内容是运动控制系统的结构及主要硬件电路的设计。首先介绍了移动机器人控制系统的总体组成和行驶机构,DSP 的功能分析及驱动电机选型;然后详细介绍了运动控制系统硬件电路的设计,针对主要的电路结构进行了详细设计和电路分析,其中包括通信模块、ADC 电路、信号隔离电路和电机驱动控制等。

第三章是本系统的软件控制策略。首先介绍了软件控制的总体结构,然后分别介绍了各模块程序流程与主要的控制寄存器设置,包括脉冲输出与转向控制、串行通信与数据校验、A/D 转换、QEP 电路及 FLASH 引导程序。

第四章讨论了步进电机的速度控制器的设计。本章讨论了步进电机的升降速曲线和电机模型及 PID 控制在 DSP 中的实现,并介绍了模糊控制器的结构、仿真实验和模糊控制查询表的计算,最后结合 PID 控制和模糊控制的优点设计了参数自整定模糊 PID 控制器,并进行了仿真分析。

第五章是整个论文的结束语,对现有工作和成果做了总结,指出了有待改进之处,提出了今后工作的重点和研究方向。

第二章 移动机器人运动控制系统结构与硬件设计

2.1 移动机器人控制系统的整体结构

2.1.1 控制系统的组成

移动机器人为一自主移动的六轮小车，其控制系统在结构上是分布式。主控计算机是一台 PC 机，作用是实现控制策略，发出控制指令，进行远程监控；下位机是一台工控机，固定在机器人移动车体上，负责接收主控计算机指令并分配给各子系统，同时把各子系统的检测信息发送到 PC 机，两者通过无线网桥进行通信。该控制系统在功能上主要由以下几部分组成：规划决策子系统、无线通信子系统、感知子系统、运动控制子系统。从控制理论的角度讲，这几部分组成一个闭环系统：视觉子系统采集场地信息，由通信子系统将信息传递给规划决策子系统，规划决策子系统的指令由无线通信子系统发送到运动控制子系统，最后由运动控制子系统完成指令分配，协调控制各驱动轮转动，其组成结构如图 2-1 所示，控制过程原理如图 2-2 所示。

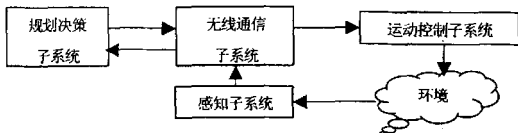


图 2-1 移动机器人组成原理图

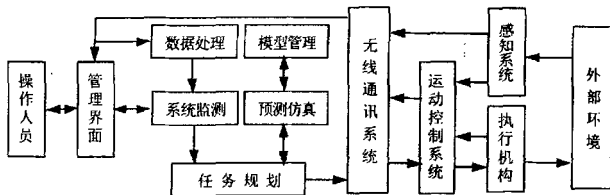


图 2-2 移动机器人控制过程原理图

规划决策子系统是移动机器人的核心部分，主要作用是辨识感知子系统的信息，快速准确的建立和维护环境模型，求解感知子系统的标定参数，确定机器人的位置和姿态，对机器人进行路径规划和行为决策，设定下一步各子系统的任务，并根据反馈信息对各子系统进行监控和故障诊断。

感知子系统主要包括双目视觉、激光雷达、图像处理卡、云台及相关控制。双目视觉和激光雷达同时对环境信息进行采集，提供机器人车体状态和工作环境。激光雷达可进行左右各 120° 横滚，上下各 60° 俯仰，可观测到车体前方进行较大范围内的路障信息。

在双目视觉中,一个摄像头固定在车体顶端的云台上,可以进行 360° 旋转,采集车体周围环境的全景信息,另一个摄像头位于车体前端较低部位,主要用来发现车体前方较小的障碍物。追踪目标时,云台转动使目标处于摄像头的中心位置。

无线通信子系统主要是保证控制指令和反馈信息的可靠传输,主控计算机(PC机)与下位机(工控机)之间的通信由无线网桥实现,PC机的RS-232数据和指令经过调制模块发送。工控机统一控制车体上各子系统与主控计算机之间的通信,不具备决策能力,它接收信息并解调成RS-232数据,根据要求反馈系统各种状态信息。对于各子系统来说,它是一个透明设备。

运动控制子系统是移动机器人的执行机构,根据上位机指令实现机器人的前进、后退和转弯等不同动作,主要由运动控制系统、驱动电机、光电编码器及必要的外围电路组成。运动控制系统要根据不同的指令完成对各个电机的转速分配和协调,控制量及里程计信息计算、控制脉冲输出、反馈信号的接收及相关信息的发送。

2.1.2 运动控制系统的行驶机构

移动机器人应满足各种复杂环境的准确控制,这要求运动控制系统必须有良好的灵活性和机动性,具备各个方向行驶能力和原地转向能力。机器人还应该有良好的爬坡和越障能力,这要求运动控制系统具备较强的驱动能力,可采用多轮驱动方式。移动机器人需要综合各种情况做出决策,因此在信息反馈和控制指令下达之间有一定时延,为安全起见,机器人运动速度必须有一个上限。为此,移动机器人行驶机构是运动系统设计中首先要考虑的一个关键问题。

常用的行驶机构有履带式、腿式和轮式。履带式结构具有良好的稳定性能、越障性能和较长的寿命,适合在崎岖的地面上行驶,但沉重的履带和繁多的驱动轮使其整体结构笨重,消耗功率较大^[26]。腿式结构具有良好的越野能力和适应能力,但效率较低。轮式结构效率最高,运动速度快,而且随着各种车轮底盘的出现,轮式结构使机器人的越野能力已可以和腿式机器人相媲美,因此在移动机器人研究中更多的采用轮式机构^[27]。

参考行驶机构的研究状况及不同结构之间的适应环境,在本课题中移动机器人的行驶机构采用六轮摇臂式结构,该结构由左右两个侧摇臂和一个后摇臂组成,侧摇臂连接前轮和中轮,后摇臂连接两个后轮,两个后轮和两个前轮分别独立驱动,其简要结构图如图2-3(a)和图2-4(a)所示,图2-3(b)为机器人爬坡时侧摇臂状态,图2-4(b)为机器人后轮处于越障时后摇臂的状态。这种特殊的结构使各驱动轮平均分配负载,配合六轮独立驱动,可以提高机器人的越障能力和机动性。

移动机器人车体底板为长方形,长度为1100mm,宽度为750mm,前轮与中轮轮距为350mm,中轮与后轮轮距为450mm,左右轮距为680mm,车轮直径为300mm,每个车轮上安装一个电机和一个电机驱动器,前轮装有光电编码器。

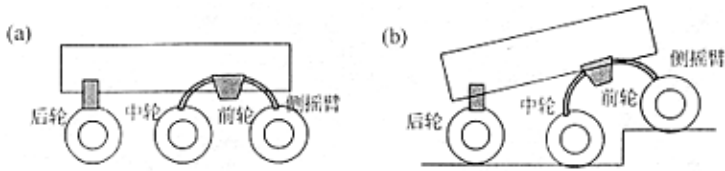


图 2-3 侧摇臂结构

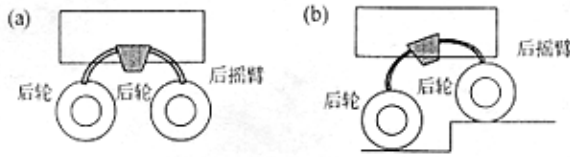


图 2-4 后摇臂结构

2.2 DSP 运动控制系统的总体设计

2.2.1 DSP 选型及 TMS320 LF2407 介绍

在机器人运动控制系统中，处理器件接受高层控制级的指令，计算和输出控制信号，监控系统状态，因此系统要求处理器具有较强的运算能力、较短的运行周期及高度可靠的性能。TI 公司的 x24x 系列 DSP 将高速计算能力和面向电机的高效控制能力集为一体，不但能完成现代控制理论或智能控制理论的一些复杂算法，而且简化了硬件结构和体积，提高了系统可靠性，使得它在机器人控制中越来越多的被采用。TMS320LF240x 是 x24x 系列中的新成员，被广泛应用于代码开发、系统仿真和实际应用中。

为最终确定微处理器，下面把拟选用的 TMS320LF2407(LF2407)和 INTEL 公司的高性能单片机 80C196KC^[28]进行比较，表 2-1 简要列出了两者的主要性能。

表 2-1 TMS320LF2407 和 80C196KC 的参数对比

	80C196KC	TMS320LF2407
数据位数	16	16
制造工艺	CHMOS	亚微米 CMOS
片内 RAM(字)	488	544 字 DARAM; 2K 字 SARAM
ROM	16K(EPROM)	32K(EEPROM); 256 字程序引导 ROM
处理速度	N/A	30MIPS
16×16 位乘法时间	1.4μs	33ns
引脚数目	68(PGA 封装)	144(PQ 封装)
PWM 输出	3 个输出引脚	12 个输出引脚
电机反馈接口	无	有
ADC	8/10 位可调	可单独控制的 16 通道 ADC

由表可见，LF2407 在整体性能上远远超过了 80C196KC，所以本系统选用 TMS320 LF2407 DSP。LF2407 芯片是 TMS320LF240x 系列中功能最强、片内设备最完善的一个。

型号，采用 C2xx CPU 内核，具有 33MIPS 处理速度，供电电压为 3.3V，具有强大的电机控制外围设备和大容量片内存储器，并带有两个事件管理器(EVA 和 EVB)和外部存储器扩展功能，在与现存的 24x DSP 控制器代码兼容的同时，具有更快的处理速度、更好的外设集成度、更高的实时性等特点，它的主要功能结构如图 2-5 所示^[29]。

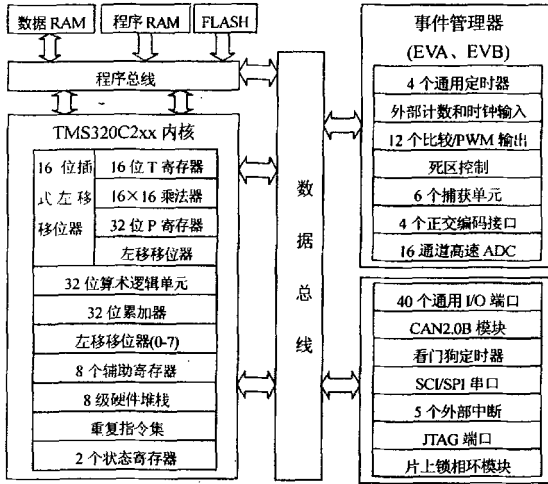


图 2-5 TMS320LF2407 主要功能结构图

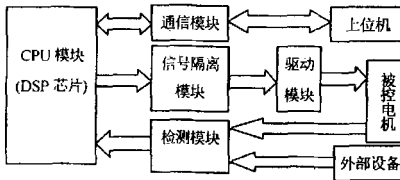


图 2-6 DSP 运动控制系统功能模块

2.2.2 DSP 运动控制系统功能分析

根据系统控制要求，DSP 运动控制系统的主体部分相互之间的关系如图 2-6 所示。

通信模块：通过串行口从工控机(下位机)读取控制指令，向工控机发送检测信息或故障诊断信号，并接收陀螺仪和倾角传感器的信息。

信号隔离模块：接收外部输入并进行 A/D 转换，对输出控制信号进行运算放大。

驱动模块：由驱动电机、电机驱动器和减速器组成，负责把控制脉冲转换成各电机转动角度，实现机器人移动。

检测模块：该模块主要采集反馈信号，包括电机转速、转向，蓄电池电压等，主要由编码器、A/D 转换和必要的外围电路组成。

CPU 模块：这是运动控制系统的核心部分，由 DSP 和相关外围电路组成，完成控制量计算，各驱动轮速度分配，检测信号处理等功能。

2.2.3 驱动电机的选型

在电动执行机构中，有直流电机、交流电机、步进电机和直接驱动电机等实现旋转运动的电动机，以及实现直线运动的直线电机。目前在机器人的运动控制中较为常用的电机有直流伺服电机、交流伺服电机和步进电机，它们的特性、工作原理与控制方式如表 2-2 所示^[30]。

表 2-2 不同电机的特性、工作原理与控制方式

电机类型	主要特点	构造与工作原理	控制方式
直流伺服电机	接通直流电即可工作，控制简单；启动转矩大、体积小、重量轻，转速和转矩容易控制，效率高；需要定时维护和更换电刷，使用寿命短、噪声大。	由永磁体定子、线圈转子、电刷和换向器构成。通过电刷和换向器使电流方向随转子的转动角度而变化，实现连续转动。	转速控制采用电压控制方式，两者成正比，转矩控制采用电流控制方式，两者也成正比。
交流伺服电机	没有电刷和换向器，无需维护；驱动电路复杂，价格高。	按结构分为同步和异步电机，无刷直流电机结构与同步电机相同，特性与直流电机相同。	分为电压控制与频率控制两种方式。异步电机通常采用电压控制。
步进电机	直接用数字信号控制，与计算机接口简单，没有电刷，维护方便，寿命长。缺点是能量转换效率低，易失步，过载能力弱。	按产生转矩的方式可以分为：永磁式、反应式和混合式。混合式能产生较大转矩，应用广泛。	永磁式是单相励磁，精度高，但易失步；反应式是双相励磁，输出转矩大，转子过冲小，但效率低；混合式是单-双相励磁，分辨率高，运转平稳。

步进电机作为一种新型的自动控制系统的执行机构，得到越来越广泛的应用，进入了一些高、精、尖的控制领域^[23]。步进电机虽然有一些不足，如启动频率过高或负载过大时易出现丢步或堵转，停止时转速过高易出现过冲，且一般无过载能力，往往需要选取有较大转矩的电机来克服惯性力矩。但步进电机点位控制性能好，没有累积误差，易于实现开环控制，能够在负载力矩适当的情况下，以较小的成本与复杂度实现电机的同步控制。综合考虑控制要求、成本等多方面因素，本系统选用步进电机作为驱动电机。

为满足系统控制要求，步进电机要进行选型，主要考虑因素有电机转矩、功率损耗、转速及外形尺寸。

(1) 驱动轮转矩

移动机器人每个驱动轮上的最小转矩可以通过如下公式进行计算：

$$\text{静态摩擦力: } F_r = k \times m \times g \times \cos \theta \quad (2-1)$$

$$\text{滑动摩擦力: } F = m \times g \times \sin \theta \quad (2-2)$$

$$\text{每个驱动轴的转矩: } T_g = 1/N \times (F + F_r) \times R \quad (2-3)$$

每个电机的转矩: $T_m = T_g / H_g$ (2-4)

其中, k 是静态摩擦系数; m 机器人质量; g 重力加速度参数; R 为车轮半径; H_g 为减速箱的减速比; N 为驱动轮数目; θ 为机器人爬坡角度。

(2) 电机功耗

电机功耗: $P = V \times I$ (2-5)

其中, V 是电机额定电压; I 为电机电流, 且 $I = T / K_t$;

电流 I 也可以通过转矩计算得到:

电机总转矩: $T \approx T_m + T_r$

内部摩擦转矩: $T_r = I_0 \times K_t$

因此, $I = T / K_t = (T_m + T_r) / K_t = T_m / K_t + T_r / K_t$
 $= T_m / K_t + I_0$ (2-6)

其中, T_m 为负载转矩; K_t 为电机规格的转矩常量; T_r 为电机规格的摩擦转矩常量; I_0 为电机空载电流。

(3) 电机转速

电机转速由电源电压和电流决定, 关系如下:

$n = (U - I \times r) / K_{bemf}$ (2-7)

所以, 机器人移动速度 v 可以按下式计算得到:

$v = (2 \times \pi \times R \times n) / (60 \times H_g)$ (2-8)

其中, H_g 为涡轮减速箱的减速比; r 为电枢电阻; K_{bemf} 为电动势系数。

根据以上要求, 本系统驱动电机选型计算如下: 系统设计车体最大负重为 60kg, 采用 30cm 直径的车轮, 则在 30° 的坡度下, 当考虑静态摩擦系数为 $k=0.5$ 时, 机器人需要驱动总扭矩为 $T = 0.15 \times 60 \times 9.8 \times (\sin 30^\circ + 0.5 \times \cos 30^\circ) \approx 82.29 \text{N}\cdot\text{m}$, 采用减速比为 1:15 的涡轮蜗杆减速器, 则每个电机需要提供扭矩为 0.91N·m。

本系统选用美国 SHAPHON 公司的步进电机, 参考表 2-3 的指标, 并考虑适当的裕量, 选用电机扭矩为 1.30N·m, 型号为 23HS3002z 型, 该电机是两相混合式步进电机, 步进角为 1.8°, 则根据表 2-3, 电机最大负载时的速度为 $240 / (\pi \times 0.30) / 60 / 15 = 0.25 \text{m/s}$, 此时减速器扭矩为 22.5N·m。

表 2-3 电机性能参数

测试条件	驱动器电压: DC40V, 驱动器电流为额定电流, 驱动器细分数 5, 步距角 0.36°, 负载半径 2cm							
频率	500Hz	1KHz	2KHz	4KHz	6KHz	8KHz	10KHz	12KHz
转速	30r/min	60r/min	120r/min	240r/min	360r/min	480r/min	600r/min	720r/min
23HS3002	1.78Nm	1.60Nm	1.50Nm	1.30Nm	0.78Nm	0.66Nm	0.48Nm	0.41Nm

2.3 运动控制系统的硬件电路设计

本系统中,移动车体由六个步进电机驱动,运动控制系统以 LF2407 为核心,基本结构框图如图 2-7 所示^[31]。在系统中,同侧的电机采取相同的控制信号,这样的优点是机器人车体的转弯半径为 0,控制灵活,同时避免了 DSP 定时器不能输出 6 路信号的不足,减少了软件设计复杂度。

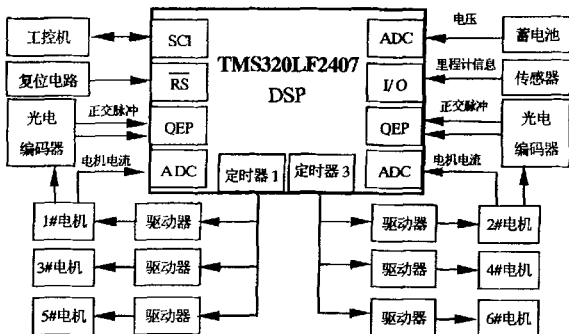


图 2-7 运动控制器结构图

2.3.1 复位和时钟电路

1 复位电路

在控制系统上电后,要使系统正常工作,首先要对 DSP 的寄存器和输入输出端口进行复位操作。LF2407 的 \overline{RS} 引脚(133 号)是控制器复位引脚,该引脚为低电平时 DSP 控制器终止执行,并使 $PC=0$;当该引脚拉为高电平时,从程序存储器的 0 位置开始执行。当看门狗定时器(WDT)定时时间溢出时,该引脚产生一个系统复位脉冲。图 2-8 所示为常用的 DSP 复位电路。电源刚加上时,LF2407 处于复位状态,电路复位时间由 R 和 C 确定,为使芯片初始化正确,一般应保证 \overline{RS} 为低电平至少 3 个时钟周期,时钟为 33MHz 时为 99ns,但同时考虑 DSP 的晶体振荡器上电后需要的稳定时间,可设定低电平时间处于 100ns~200ns 之间。

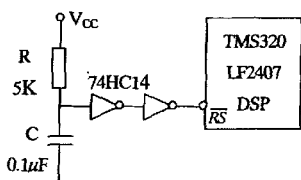


图 2-8 复位电路图

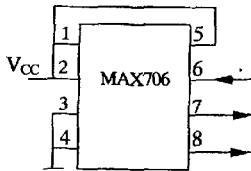


图 2-9 MAX 自动复位电路

A 点电压 $V_A = V_{CC}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$, 其中 τ 为时间常数,且 $t=RC$ 。假设低电平与高电平分

界点为 $V_0=1.5V$ ，则当 $V=V_0$ 时所经过的时间 t_0 为：

$$t_0 = -RC \ln\left(1 - \frac{V_0}{V_{CC}}\right) \quad (2-9)$$

选择 $R=5K\Omega$ ， $C=0.1\mu F$ ， $V_{CC}=5.0V$ ，由上式得 $t_0=178.5ns$ ，因此施密特触发器 74HC14 使低电平保持时间至少为 179ns，满足系统的复位要求。

实际上由于 DSP 的时钟频率比较高，在运行时极有可能发生干扰和被干扰现象，甚至会导致死机。为克服这种情况，除软件上做一些保护措施，硬件上也必须有相应的处理，最有效的措施就是采用具有监视功能的自动复位电路。自动复位电路除具有上述复位功能外，还具有监视系统运行并在系统发生故障或死机时再次进行复位的功能。系统正常运行时，应在规定时间内给监视信号一个高低电平发生变化的信号，如果在规定时间内这个信号没有变化，自动复位电路就认为系统工作不正常，并对其进行复位。

根据此原理，可以用常用元器件设计相应的自动复位电路，也可以采用专门的自动复位电路元件，图 2-9 为采用 MAX706 实现的自动复位电路。其中，管脚 1 为人工复位输入，当其电压低到 0.1V 以下时将触发一个复位脉冲，该脚可由 TTL 或 CMOS 电平驱动；管脚 2 为 +5V 电平输入；管脚 3 为地；管脚 4 为电源故障电压监控输入端，不用时将该脚接地或 V_{CC} ；管脚 5 为电源故障输出端，平常该脚为高电平；管脚 6 为看门狗输入端，如果该脚保持在高电平或低电平 1.6s，则看门狗定时器完成计数，管脚 8 变为低电平，发生复位信号时看门狗定时器被清零；管脚 7 为低电平复位输出端，触发后产生 200ms 的负脉冲；管脚 8 为看门狗输出端，为系统提供监视信号^[32]。

在本系统设计中，为简便起见，采用图 2-8 的复位电路， $t_0=179ns$ ，满足系统复位要求。

2 时钟电路

给 DSP 提供时钟有两种方法：一是利用 DSP 芯片内部的晶振电路，在 DSP 芯片的 XTAL1/CLKIN 和 XTAL2 之间连接一个晶体就可以启动内部振荡器，如图 2-10 所示，晶体为基本模式，采用并联谐振。另一种方法就是将外部时钟源直接输入 XTAL1/CLKIN 引脚，XTAL2 悬空，采用封装好的的晶体振荡器，使用方便。考虑到调试方便，本系统采用前一种方法，其中晶振为 16.0000MHz。

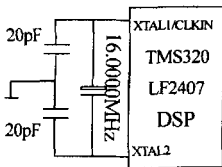


图 2-10 内部振荡电路

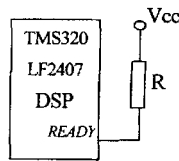


图 2-11 系统无需等待电路

不同的硬件接口访问速度有差异，如果直接访问会造成时序的不匹配。因此，为保证设备在同一时序下工作，有必要通过外界调整的方法超前或延时时序，普遍采用的方

法时插入等待状态发生器。当与慢速外设接口时,系统必须提供能产生等待状态的硬件电路,根据外设的存取速度来决定所需的等待数。如果系统所有器件均为高速,不需等待状态,则只需将 READY 管脚通过一个上拉电阻接到高电平,如图 2-11 所示。访问外部设备时,READY 被拉低来增加等待状态,它还可以和程序空间选通引脚 PS、数据空间选通引脚 DS 和 I/O 空间选通引脚 IS 组合,对相应的外设插入等待状态。它表示一个外部器件为将要完成的总线处理做好准备,若该外设未准备好,则将 READY 拉为低电平,处理器将等待一个周期,并且再次检测 READY。此时,如需处理器检测 READY,程序至少设定一个等待状态,等待状态发生控制寄存器(WSGR)至少设定一个等待状态。

2.3.2 模数转换电路

DSP 内部运行的是数字信号,为处理外部输入的模拟信号,模数转换电路(ADC)是一个重要部分。在机器人运动控制系统中,ADC 的主要功能是接收外界的检测信号,如蓄电池电压、驱动电机电流等信号。

在本系统中,采用分流电阻作电流传感器,其选定的阻值应能在功放电路达到最大电流时激活内置的过流保护功能,分流电阻的电压经过 ADC 模块送入 LF2407。

TMS320LF2407 的 ADC 包括 2 个带有采样/保持的 10 位模数转换模块,共 16 个模拟输入通道,两个独立的最多可选择 8 个模拟转换通道的排序器(SEQ1 和 SEQ2),在给定的排序方式下,4 个排序控制器(CHSELSEQn)决定了模拟通道转换顺序,可单独访问的 16 个结果寄存器,多个触发源(软件、EVA、EVB、外部 ADCSOC 引脚)可以启动 A/D 转换^{[29][31]}。

ADC 的参考电压必须由外部电压源提供,小于或等于 5V 的直流参考电压连接到 V_{REFH} 和 V_{REFLO} 引脚,同时 V_{CCA} 和 V_{SSA} 分别连接到直流电源(3.3V)和模拟地。此时, V_{CCA} 和 V_{SSA} 需与数字供电电压和数字地分开以提高精度。由于步进电机和蓄电池的最高电压为 40V,所以模拟参考电压的高端 V_{REFH} 为 40V, V_{REFLO} 端接地。

每个控制周期开始,ADC 触发,对电机电流和蓄电池电压进行采样,通过通道 0 和 1 转换,将转换结果送入中间寄存器供系统读取。10 位 ADC 转换处理的数字结果可表示为:数字结果=1023×(输入电压- V_{REFLO})/(V_{REFH} - V_{REFLO})。转换时间与给定序列中转换的个数有关,转换周期可被分成 5 个阶段,各阶段所需时钟周期如表 2-4 所示^[31]。

表 2-4 ADC 转换各阶段所需时钟周期数

转换阶段	CLKOUT 时钟周期(PS=0)	CLKOUT 时钟周期(PS=0)
启动 SOS 同步	2	2 或 3+
采样时间 ACQ	2++	4++
转换时间 CONV	10	20
结束转换时间 EOC	1	2
转换完成后设置标志位时间 EOS	1	1

其中, SOS 时序同步只在一个转换序列的第一个通道转换时需要;序列转换完成后设置

标志位时间仅在一个序列的最后一个转换时需要。上表“+”表示在 CPS=1 时, 启动时序根据软件设置的触发方式使用 CLKOUT 时钟周期同步 ADC 的时钟周期 ADCCLK; “++”表示采样时间和 ACQ PS_n 上的位有关, 当 ACQ PS=1、2 和 3 时采样时间如表 2-5 所示。

表 2-5 ACQ PS = 1、2 和 3 时的采样时间

ACQ PS	CPS0	CPS=1
1	ACQ=4	ACQ=8
2	ACQ=6	ACQ=12
3	ACQ=8	ACQ=16

每个 ADC 单元在 1 个预定标时钟周期内完成输入采样, 在 4 或 4.5 个预定标周期内完成转换。为保证转换精度, 每个 ADC 单元的所需的时间为 $5.5\mu\text{s}$ 或更多, 要求采样/转换时间要大于 $5.5\mu\text{s}$ 以保证正确, 因为系统时钟可能不满足这个要求, 因此 ADC 提供了一个预定标因子来保证 DSP 时钟变化时 ADC 可以保持最优性能。预定标值必须满足: 系统时钟周期 \times 预定标因子 $\times 5.5 \geq 5.5\mu\text{s}$ 。预定标因子的值由 ADCTR1 寄存器中的 ACQ PS3~ACQ PS0 位段域和 CPS 位实现。如果 ACQ PS3~ACQ PS0 的值全为 0, 即预定标值为 1, 并且 CPS 为 0 时, PS 时钟将和 CPU 时钟一样, 对于其它预定标值, PS 都会被放大(即增加了采样/保持窗口的时间)。

2.3.3 串行通信接口

在 LF2407 中, 有两种通信接口: 串行通信接口(SCI)和串行外设接口(SPI), 分别实现不同场合的通信。SCI 支持 CPU 和使用标准 NRZ(非归零)格式的异步设备之间的通信, 其接收和发送是双缓冲的, 每个都有独立的中断请求信号和中断矢量, 二者可独立的工作于全双工模式。SPI 是一个高速同步串行输入输出接口, 用于 DSP 控制器和外部设备或其它控制器之间的通信^{[33][34]}。本系统中, 通信模块涉及到 DSP 和下位机(工控机)之间的双向通信, 主要任务是接收上位机的指令, 向上位机传送机器人当前状态和里程计信息。考虑到通信接口不涉及外部设备, 所以选择 SCI 方式。

SCI 是一个全双工串行口, 通过两个 I/O 引脚 SCIRXD 和 SCTIXD 分别用于接收和发送数据。根据需要只需配一些驱动和隔离电路, 就可以组成一个简单可行的通信接口。根据 RS-232 电气特性: 接口信号电平较高, 与 TTL 电平不兼容, 逻辑“1”为 -15~-3V, 实际常用为 -12V; 逻辑“0”为 +3V~+15V, 实际常用 +12V。所以 RS-232 与 DSP 中的 TTL 电平之间要外加电路实现电平转换。

在 DSP 和工控机之间采用符合 RS-232 标准的驱动芯片 MAX232 进行串行通信^[35]。MAX232 只用单一 +5V 电源, 芯片内部有电泵, 不需外接 ±12V 电源, 仅需外接 $0.1\mu\text{F}$ 或 $1\mu\text{F}$ 电容, 可在一般需要串行通信的系统中使用。该芯片具有两个发送器和接收器, 我们只使用其中一对, 另外一对输出和接收端悬空即可。RS_IN 和 RS_OUT 为 RS-232 接口端, 分别与工控机串行口的 TXD(发送引脚)和 RXD(接收引脚)连接, TTL_IN 和

TTL_OUT 为 TTL 电平端，与 DSP 的 SCITXD 和 SCIRXD 引脚连接。整个接口电路简单、可靠，其电路见图 2-12。

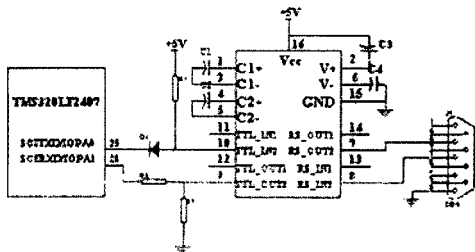


图 2-12 TMS320LF2407 与 MAX232 接口电路

2.3.4 信号隔离电路

步进电机是感性负载，工作电压(24~40V)高于 DSP 电压，因此 DSP 与驱动电路间要有隔离电路。本系统采用光电耦合器来完成信号的隔离，以避免前后两级信号产生相互干扰，如图 2-13 所示。其中，输出信号为两路步进脉冲(IOPB.0 和 IOPE.0)和两路转向标志(IOPC.0 和 IOPF.0)，TLP521-4 是光电耦合器。

TLP521-4 是发光二极管与光电晶体管封装的光电耦合器，结构为双列直插 4 引脚塑封，内部带有 4 个相同的光电耦合电路，主要用于开关电源电路中，其原理图如图 2-14 所示。光电耦合器的检测方法(以第一路光电耦合为例)：

(1)电阻检测法：引脚 1 和 2 之间正向电阻为 45~60Ω，输出引脚 16 和 15 之间正向电阻为 300~500K，两者反向电阻均为无穷大。

(2)加电检测法，在光电耦合器的初级，即 1~2 引脚间加上+5V 电压，电源电流限制在 35mA 左右，可在+5V 电源正极串一支 150Ω，1/2W 的限流电阻。加电用 RX1K 档测次级正向电阻，即 15~16 引脚间，一般在 30Ω~100Ω 之间为正常，偏差太大为损坏。测量上述引脚间的反向电阻为无穷大，如偏小则为漏电或击穿。

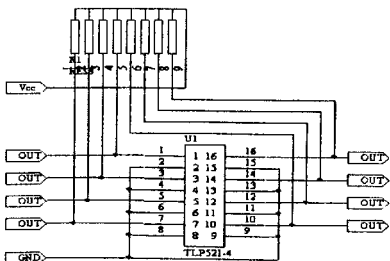


图 2-13 信号隔离电路

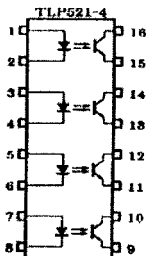


图 2-14 TLP521-4 内部耦合电路

2.4 步进电机的驱动控制

电机是系统输出端和执行元件，其驱动控制电路的设计直接影响移动机器人的运动性能。电机控制系统分为两大部分：步进电机和驱动器。驱动器内部脉冲发生器所产生的脉冲信号，通过环形分配器按一定的顺序加到电动机各相绕组上，环形分配器的输出脉冲信号还需进行功率放大，保证有足够的驱动功率。将环形分配器、功率放大器以及其他控制线路的组合即为步进电机驱动器。

当驱动器接收到一个脉冲信号，它就驱动步进电机按设定的方向转动一个固定的角度(步进角)，通过控制脉冲个数来控制角位移量，从而达到准确定位的目的；同时可以通过控制脉冲频率来控制电机转动的速度和加速度，从而达到调速目的。驱动器要求的脉冲信号一般为 TTL 电平兼容的方波信号，而步距角选择和电机使能信号为 TTL 电平信号。

2.4.1 电机与驱动器接口

本系统选用美国 SHAPHON 公司的步进电机，型号为 23HS3002 型，该电机是两相混合式步进电机，步进角为 1.8° 。它的配套驱动器是 SH-2H057M 型，并具有过流、过温等保护电路。本驱动器的输入信号共有三路：步进脉冲信号 CP、方向电平信号 DIR、脱机信号 FREE。它们在驱动器内部分别通过 270Ω 的限流电阻接入光耦的负输入端，且电路形式完全相同，如图 2-15 所示。



图 2-15 驱动器输入信号内部电路

OPTO 端为三路信号的公共阳端(三路光耦的正输入端)，三路输入信号在驱动器内部接成共阳方式，所以 OPTO 端须接外部系统的 V_{cc} ，如果 V_{cc} 是 +5V 则可直接接入；如果 V_{cc} 不是 +5V 则须外部另加限流电阻 R，参见表 2-6，保证给驱动器内部光耦提供 8mA~15mA 的驱动电流。

表 2-6 驱动器外接限流电阻 R

信号幅值	外接限流电阻 R
5V	不加
12V	680Ω
24V	1.8K

本驱动器的 CP 信号为低电平有效，要求 CP 信号的驱动电流为 8mA~15mA，对 CP 的脉冲宽度也有一定的要求，一般不小于 $5\mu s$ 。

方向电平信号 DIR 用于控制步进电机的旋转方向。此端为高电平时，电机一个转向；此端为低电平时，电机为另一个转向。电机换向必须在电机停止后再进行，并且换向信号一定要在前一个方向的最后一个 CP 脉冲结束、下一个方向的第一个 CP 脉冲前发出，如图 2-16 所示

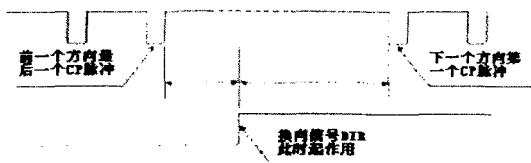


图 2-16 换向信号 DIR 作用时刻

当驱动器上电后，步进电机处于锁定状态(未施加 CP 脉冲时)或运行状态(施加 CP 脉冲时)，如果需要手动调整电机而不关闭驱动器电源时可以用到脱机信号 FREE。当此信号起作用时(低电平有效)，电机处于自由无力矩状态；当此信号为高电平或悬空不接时，取消脱机状态。如果不需要此功能，此端不接即可。

SH-2H057M 型驱动器用于驱动二相或四相混合式步进电机，一般驱动 60 座以下电机。电机的出线方式不同，与驱动器的连接也不同，一般有以下几种方式：

(1) 对于二相四根线电机，可以直接和驱动器相连(见图 2-17a)，本系统中的接线方式即为该种方式。

(2) 对于四相六根线电机，中间抽头的二根线悬空不接，其它四根线和驱动器相连(见图 2-17b)；

(3) 对于四相五根线电机，由于绕组都不独立，此电机不能和驱动器相连；

(4) 对于四相八根线电机，通常把绕组两两并联后和驱动器相连(见图 2-17c)。

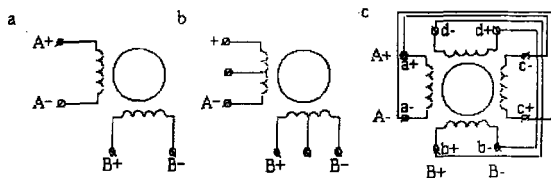


图 2-17 步进电机接线图

本驱动器需要外部提供一组直流电源，电压范围为 DC(24~40)V；电源电流值根据电机相电流确定，一般不小于电机相电流。此电源可以由一变压器变压后加整流滤波(无需稳压)组成，如图 2-18 所示；或者由一开关电源提供。

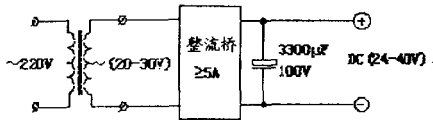


图 2-18 驱动器电源

驱动器拨位开关的 1-3 位用于设定驱动器的细分数。对于两相和四相电机，细分后的步距角等于电机的整步步距角除以细分数，例如细分数设定为 40、驱动 0.9°/1.8°电机，其细分步距角为 $1.8^\circ/40=0.045^\circ$ ，在系统频率允许的情况下，尽量选用高分数。拨位开关第 6-8 位用于设定电机的相电流（额定电流），根据面板上的表格把驱动器的输出电流设定为电机的相电流，如果找不到与电机相电流相同的值，可以按最接近的值设定。驱动器拨位开关的第 4、5 位须拨在 OFF 位置。

2.4.2 电机转向和速度检测

在 LF2407 的两个事件管理器中，均有一个正交编码脉冲(QEP)电路，当 QEP 被使能（禁止捕获功能），定时器 2 对引脚 CAP1/QEP1 和 CAP2/QEP2、定时器 4 对引脚 CAP4/QEP3 和 CAP5/QEP4 上的脉冲数目和频率分别解码和计数^[36]。

每个正交编码脉冲是两个频率变化且正交的脉冲序列。当电机轴上的光电编码器产生正交脉冲时，方向检测逻辑通过检测中哪个序列领先可确定电机转向，相应的定时器中的计数器对捕获的信号进行加减计数，根据计数值和计数方向即可得到电机的角位移和转向。由于两列输入脉冲每个边沿都被 QEP 电路计数，因此产生的时钟频率 CLK 为输入序列的 4 倍，如图 2-19 所示，并把这个时钟定时器 2 和 4 的外部输入时钟，计数器为定向增/减计数方式。

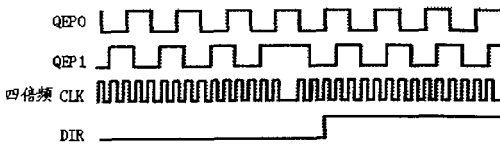


图 2-19 正交编码脉冲和定时器时钟及方向

数字伺服系统中大量采用光电编码器作为位移检测元件，它是一种角度/角速度检测元件，利用光电转换原理直接将位移或角度的模拟信号转换成相应的电脉冲或数字量，具有分辨率高、体积小、精度高、工作可靠和接口数字化等优点，应用广泛。光电编码器一般有增量式和绝对式两种，本系统中在两个前轮安装采用增量式光电编码器进行检测，型号为 EPC-755A，是美国 ENCODER PRODUCTS 公司生产的微型光电编码器，具有重量轻、体积小、耐碰撞、易安装等优点，其直径和长度均为 1.5 英寸，具有多种灵活的安装方式。该光电编码器输出为双通道正交信号 A、B，具有校正基准信号 Z，可方便地

实现双向计数，输出电路选用集电极开路型。A、B 信号的相位差为 90° ，利用 A、B 信号的相位关系即可判断位移或速度方向，对 A、B 脉冲计数即可获得位移或速度值。其检测信息反馈到 DSP 的正交编码脉冲电路 (QEP)，把检测到的脉冲信息与给定的脉冲数进行比较，分析电机是否出现堵转、失步等故障。

为了提高检测精度，可将脉冲信号四倍频后送入计数器计数。为提高抗干扰能力，可在光电编码器输出和四倍频之间加入差动接收以及光电隔离电路。

两相混合式步进电机低速转动时振动和噪声大是其固有的缺点，因此电机驱动器的细分数应在系统允许情况下设定较大值。如果要求步进电机运行的速度小于电机的极限起动频率，则步进电机可以按要求的速度直接起动，运行至终点后可立即停发脉冲串而令其停止。但在一般情况下，步进电机的极限起动频率是很低的，而要求的速度往往较高。如果步进电机以要求的速度直接起动，因为该速度已超过极限起动频率而不能正常起动，可能发生丢步或根本不运行的情况。电机运行起来之后，如果到达终点时立即停发脉冲串，令其立即停止，则因为电机的惯性原因，会发生冲过终点的现象。这些情况的产生是由步进电机的频率特性曲线决定的。如果转子的加速度慢于步进电机的旋转磁场，即低于换相速度，则输入电机的电能不足，在步进电机中产生的同步力矩无法令转子速度跟随定子磁场的旋转速度，从而引起失步或不运转。为了解决这个问题，一般采取一个“加速——恒速——减速——停止”的运行过程。

第三章 移动机器人运动控制系统的软件设计

在运动控制系统中，运动控制器接收控制指令，将其转换为机器人的运动参数，并接收和处理反馈信号，完成速度闭环控制。本章介绍了软件控制的总体思想与结构，然后分块介绍了各个模块程序，包括：FLASH 引导程序、通信接口程序、ADC 转换程序及系统主程序。

3.1 控制软件的结构

运动控制器的控制过程为：DSP 通过 SCI 接口接收控制指令，计算出左右两路电机的转向和转速，结合光电编码器反馈的电机当前转向和转速，经过模糊控制器处理后得到本周期电机转向和转速，并经过积分平滑后，以 DSP 通用定时器的定时中断输出脉冲。串行通信时，根据下位机发出的信号，DSP 立即发送反馈信息或在下一次通信时接收控制指令。按照软件开发的流程，上述控制过程转换成如图 3-1 所示的软件模块。

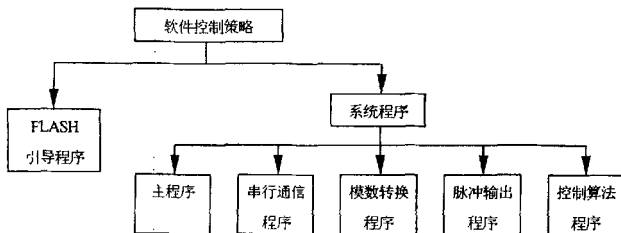


图 3-1 软件组成结构图

整个运动控制系统程序主要由 FLASH 引导程序和系统程序组成。其中，FLASH 引导程序比较简单，作用是在系统板上电后，用引导程序(boot 程序)把 DSP 的应用程序从 FLASH 引导到 DSP 系统应用板的存储资源(外部的 SDRAM 和内部的 RAM)上进行工作。系统程序由主程序、脉冲输出程序、串行通信程序、模数转换程序和模糊算法程序组成。

主程序调用各初始化子程序，进行通信接口、I/O、QEP、定时器及中间寄存器的初始化、设置中断标志、读取计数器的值、计算各控制量、积分平滑、接收光电编码器信号、计算里程计信息等功能。当发生中断时，调用相应中断程序，并修改或重置标志位。

脉冲输出程序利用两个事件管理器的定时器 1 和 3 的定时中断输出控制脉冲，当定时器中计数器的值与周期寄存器匹配时，即发生中断，向各电机输出方向和脉冲信号。

串行通信程序通过接收中断来确定 DSP 是接收还是发送数据，调用相应程序，并对接收的数据进行校验，发送反馈信号。

模数转换程序主要是对反馈信号的处理,包括电机电流、蓄电池电压等,进行限流和过流保护。

系统控制程序的编写是在 TI 公司的 DSP 芯片集成开发环境 CCS (Code Composer Studio) 中进行的,版本为 CCS2000(针对 C2xx)^[37]。程序由汇编语言完成,通过仿真器 XDS510 写入 DSP。

3.2 脉冲输出程序

在 LF2407 中,有 40 个通用、双向数字 I/O 引脚,这些引脚的功能通过 3 个 I/O 口复用控制寄存器(MCRx)和 6 个数字和方向控制寄存器(PxDATDIR)设置。MCRx 用来控制 I/O 口作为基本功能或一般 I/O 引脚功能;当 I/O 引脚用作一般功能时,PxDATDIR 可控制数据和引脚的数据方向。

在本系统中,DSP 需要输出六路控制脉冲,作为 6 个驱动电机的步进脉冲和方向信号。由于驱动轮控制简化为二轮形式,故左边三个电机和右边三个电机的脉冲和方向信号分别相同。左路由 I/OPB.0 输出控制脉冲,I/OPC.0 输出方向信号;右路的脉冲和方向信号输出由 I/OPE.0 和 I/OPF.1 完成。I/OPB、I/OPC、I/OPE 和 I/OPF 均应配置成一般 I/O 功能,下面分别介绍其对应的寄存器设置。

3.2.1 I/O 端口初始化

1 复用控制寄存器 MCRx 设置

MCRA 对应 I/OPA 和 I/OPB 端口,MCRA 的高 8 位对应 I/OPB 端口,设置成一般 I/O 功能,低 8 位中涉及到 SCI 和 QEP 功能,均设置成基本功能。

MCRB 对应 I/OPC 端口和 I/OPD.0,均设置成一般 I/O 功能,MCRB.9-MCRB.15 位必须配置成 1,这几个引脚是系统专用引脚,用作与仿真器接口(JTAG)相连,实现 DSP 的在线仿真。MCRC 对应 I/OPE 和 I/OPF 端口,由于 MCRC.7 和 MCRC.8 为 QEP 引脚(对应 IOPE.7 和 IOPF.0),需设置成基本功能,其余各位设置成一般 I/O 功能。

MCRx 的各位配置如见文献[21]和[34]所示。复用控制寄存器 MCRx 的初始化如下程序所示:

```
LACL MCRA
AND #000FFH ;OPB 口配置为一般 I/O 功能, IOPA 为基本功能, 利用 IOPB.0 输出
SACL MCRA
LACL MCRB
AND #0FE00H ;OPC 口配置为一般 I/O 功能, 高 7 位保留位为 1, 利用 IOPC.0 输出。
SACL MCRB
LACL MCRC
```

```

AND #00180H ;IOPE 和 IOPF 口为一般 I/O, 位 7~8 为 1, 利用 IOPE.0 和 IOPE.1 输出
SACL MCRC

```

2 数字和方向控制寄存器设置

当 I/O 引脚用作基本功能时, PxDATDIR 的设置影响对应的引脚数据的输入输出方向。本系统所利用的 4 个 I/O 端口均为输出模式, 且各端口寄存器的格式和设置相同, 本文以端口 B 为例介绍, 其数据和方向控制寄存器 PBDATDIR 的基本格式如表 3-1 所示。

表 3-1 PBDATDIR 单元的各位设置

15	14	13	12	11	10	9	8
B7DIR	B6DIR	B5DIR	B4DIR	B3DIR	B2DIR	B1DIR	B0DIR
RW_0	RW_0	RW_0	RW_0	RW_0	RW_0	RW_0	RW_0
7	6	5	4	3	2	1	0
IOPB7	IOPB6	IOPB5	IOPB4	IOPB3	IOPB2	IOPB1	IOPB0
RW_+	RW_+	RW_+	RW_+	RW_+	RW_+	RW_+	RW_+

表中, +表示复位后的值和引脚状态有关, R 为可读, W 为可写, _0 为复位后的值, x 为未定义。位 15~8: 各位为 0 时, 配置相应的引脚为输入方式; 各位为 1 时配置相应的引脚为输出方式。位 7~0: 如果 BnDIR=0 时: 0 表示读相应引脚的值为低电平; 1 表示读相应引脚的值为高电平; 如果 BnDIR =1 时: 0 表示相应引脚输出为低电平; 1 表示相应引脚输出为高电平;

对于端口 IOPB, 其 IOPB.0、IOPB.1、IOPB.2 用作左边电机控制脉冲输出, 需设置为输出方式, 初值均为 0, 其余位不使用。端口 IOPC 用作输出左路三个电机的转向, 其寄存器 PCDADIR 设置如表 3-1, IOPC.0 用作输出方向标志。相应的 IOPE 和 IOPF 的寄存器设置和初始化程序分别与 IOPB、IOPC 相同。PBDADIR 和 PCDADIR 的初始化如下所示:

```

LACL PBDATDIR
AND #0FF00H
SACL PBDATDIR
LACL PCDATDIR
AND #0FF00H
SACL PCDATDIR

```

3.2.2 控制脉冲的输出

在程序中, 控制脉冲的输出采取了两种实现方式: 软件延时子程序和定时中断。软件延时是对 DSP 内部时钟的循环计数进行定时输出的; 定时中断是利用 DSP 的事件管理器中的通用定时器定时中断, 调用中断服务程序实现输出的。在电机转向不变时, 转向信号也必须保持不变, 因此当执行某个控制指令时, IOPC 和 IOPF 的电平保持不变, 此时仅需计算和输出步进脉冲。

1 软件延时输出

延时方式中,利用 2 个辅助寄存器进行计数、比较实现,如将 AR4 设为当前 AR,对其进行减计数,当其值与 AR0 相等时则延时结束,可通过修改 AR4 的值实现不同时间的延时,延时结束后输出各 IO 口的值,延时程序如下所示:

```

DELAY:  MAR  *.AR4      ;AR4 为当前 AR
        LAR  AR4.#002FEH
        LAR  AR0.#00H

LOOP:   SBRK  #1        ;AR4=AR4-1
        NOP

        CMPR 00        ;当前 AR 与 AR0 比较,若相等则 TC=1
        BCND LOOP,NTC ;TC=0 则循环
  
```

2 定时中断输出

LF2407 的通用定时器 1 和 3 用于生成两路定时中断输出,LF2407 根据上位机指令计算各驱动电机转速和方向,选择回路内部分频值,确定对应定时器的周期寄存器初值,然后计数器循环计数。当计数器的值与周期寄存器匹配时,即发生定时中断,向对应 I/O 口输出控制信号。

下面以定时器 1 为例介绍其寄存器设置和应用。EVA 中对应定时器 1 的中断标志寄存器为 EVA1FRA,中断屏蔽寄存器为 EVA1MRA,程序初始化中对这两个寄存器的设置为:

```

SPLK #0FFFFh,EVA1FRA ;清除EVA所有中断标志
SPLK #0FFFFh,EVA1FRB
SPLK #0FFFFh,EVA1FRC
SPLK #070h,EVA1MRA  ;只使能周期中断
SPLK #0,EVA1MRB    ;不使能定时器2的中断
SPLK #0h,EVA1MRC   ;不使能捕获中断
  
```

通用定时器的操作模式由控制寄存器 TxCON 决定, T1CON 的各位设置如表 3-2 所示。

表 3-2 T1CON 各位设置

15	14	13	12	11	10	9	8
FREE	SOFT	保留位	TMODE1	TMODE0	TPS2	TPS1	TPS0
RW_0	RW_0	RW_0	RW_0	RW_0	RW_0	RW_0	RW_0
7	6	5	4	3	2	1	0
T2SWT1/T4SWT3	TENABLE	TCLKS1	TCLKS0	TCLD1	TCLD0	TECMP	SELTI1PR/SELT3PR
RW_+	RW_+	RW_+	RW_+	RW_+	RW_+	RW_+	RW_+

其中,位 15~14: 仿真控制位;位 13 保留位,读为 0,写无影响;位 12~11: 计数模式选择;位 10~8: 输入时钟预定标系数;位 7: 定时器 2、4 周期寄存器选择位;位 6: 定时器使能位;位 5~4: 时钟源选择;位 3~2: 定时器比较寄存器的重转载条件;位 1: 定时器比较使能位;位 0: 定时器周期寄存器选择,在定时器 2、4 中有效,定时器 1、3 中保留。

定时器周期寄存器(TIPR)的值决定了定时器的周期,当周期寄存器的值和定时器计数器(TICNT)的值产生匹配时,通用定时器的操作就停止并保持当前值,并根据计数器所处的计数方式执行复位或开始递减计数。

因此,在每个控制周期开始时,程序都要根据控制指令计算中断时间和周期寄存器的值。如:车轮直径为 300mm,减速箱减速比为 1:15,如设定电机驱动器细分数为 5,即步进角为 0.36° ,如果要求小车直线运动速度为 250mm/s,则每秒钟各电机所需的步进脉冲数为 $15 \times (0.25 / (0.3 \times \pi)) \times 360 / 0.36 \approx 3978$ 。LF2407 内部时钟为 24MHz,如选择时钟分频值为 64,则周期寄存器的值为 $24M / (64 \times 3978) \approx 94$,计数器每次计数到 94 时,即发生中断,输出一次步进脉冲和方向标志。其程序设置为:

```
SPLK   #0FFH, TIPR   :设置周期寄存器初值
SPLK   #0, TICNT     :设置定时器计数器初值
SPLK   #0164CH, TICON :TMODE=10 连续增计数模式; TPS=110 预分频为 64
                               :TENABLE=1 定时器计数使能; TCLKS=00 内部时钟
                               :TECMR=1 定时器 1 比较使能; SELTIPR=0
```

在程序初始化前,需要建立中断向量表,以便中断发生时,系统调用中断服务程序,定时中断设置为中断第二级,即:INT2 B GISR3; GISR3 为中断服务程序,其内容如节 3.2.1 所述。

3.2.3 转动角度的控制

因为上位机传送的数据是机器人的运行方向和速度,如“左 30° 方向, 25cm/s 前进”,因此脉冲输出前,需对控制指令进行分解,转换成各电机的转向和步进脉冲数。

对于指令“左 30° 方向, 250mm/s 前进”,需要控制左路 3 个电机反转,右路 3 个电机正转,使车体中心线左转 30° 。如图 3-2 所示,每个车轮沿弧线移动 30° ,根据左右轮距 680mm,弧线长度为 $\pi \times 680 \times 30 / 360 = 177.9\text{mm}$ 。车轮直径为 300mm,减速比为 1:15,步进角为 0.36° ,此时电机转动脉冲数为: $(177.9 / \pi \times 300) \times 15 \times 360 / 0.36 = 2832.8 \approx 2833$,两边电机转向相反。在机器人达到所需角度后,再以 25cm/s 速度前进,所有电机均为正转,每秒钟输出步进脉冲数均为 3978 个。

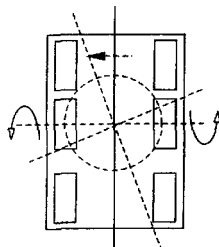


图 3-2 机器人转向示意图

机器人的运行方向改变可在短时间内完成，如当机器人转向180°，即反向行驶时，所需步进脉冲为： $(\pi \times 680 \times 180 / (360 \times \pi \times 300)) \times 15 \times 360 / 0.36 = 17000 = 17K$ ，转向可在1s内完成。当要求转向360°时，所需步进脉冲34K，超过了电机的启动频率。为避免电机失速，当要求机器人转向超过180°时，即用给定角度减去360°，作为相反转向给定。该部分程序流程如图3-3所示。

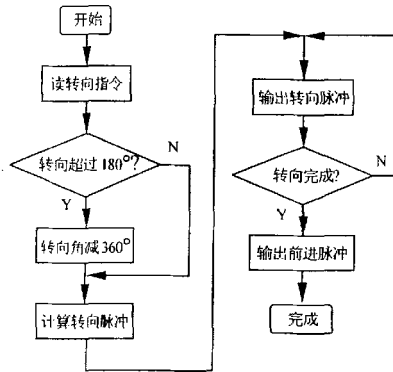


图 3-3 机器人转向时程序流程

当电机转向发生改变时，必须屏蔽相应的定时器中断，禁止步进脉冲输出后进行，

即： `SPLK #0, EVAIMRA ;禁止定时器1所有中断`

`SPLK #0, EVBIMRA ;使能定时器3所有中断事件`

当发出转向脉冲后，再重新使能定时中断，步进脉冲正常输出。

3.3 异步串行通信程序

本程序设置 DSP 有两个地址，即 AAH 和 ABH，它们分别作为上位机控制 DSP 发送和接收的命令。上位机呼叫时，DSP 判断地址：若为 AAH，就调用发送程序向上位机传送数据；若为 ABH，则 DSP 就置标志位，等待下次中断接收下传的数据，并进行校验，反馈相应的信号。

3.3.1 控制寄存器设置与波特率计算

在 x24x 的串行通信接口(SCI)工作时，利用中断进行控制，其接收器和发送器可以单独或同时工作，并具有独立的中断请求信号和中断矢量。SCI 的各种功能均可用软件设置，包括操作模式、通信协议、波特率、字符长度、奇偶校验和停止位的位数、中断优先级和中断使能控制等。SCI 无论数据接收还是数据发送，都采用 NRZ 帧格式对数据

进行编码, NRZ 数据格式包括: 一个起始位; 1~8 个数据位; 1 个奇/偶校验位(可选); 1 个或 2 个停止位; 一个用于区分数据帧和地址帧的额外位(仅用于地址位模式)。每个数据位占用 8 个 SCICLK 周期。

串行通信接口通信控制寄存器(SCICCR)定义了用于 SCI 的字符格式、协议和通信模式, 其各位设置如表 3-3 所示^{[33][34]}。

表 3-3 SCICCR 各位设置

7	6	5	4	3	2	1	0
STOP BITS	EVEN/ODD PARITY	PARITY ENABLE	LOOPBACK ENA	ADDR/IDLE MODE	SCIHAR2	SCIHAR1	SCIHAR0
RW_0	RW_0	RW_0	RW_0	RW_0	RW_0	RW_0	RW_0

其中, 位 7: SCI 停止位选择位; 位 6: 奇偶选择位; 位 5: 奇偶选择位使能位; 位 4: 自测模式使能位; 位 3: SCI 多处理器模式选择位; 位 2~0: 字符长度选择位。

串行通信接口控制寄存器(SCICTL1)控制着接收器和发送器使能位、TXWAKE 和 SLEEP 功能、内部时钟使能以及串行通信接口的软件复位, 其各位设置如表 3-4 所示。

表 3-4 SCICTL1 各位设置

7	6	5	4	3	2	1	0
保留位	RX ERR INT ENA	SW RESET	保留位	TXWAKE	SLEEP	TXENA	RXENA
R_0	RW_0	RW_0	R_0	RS_0	RW_0	RW_0	RW_0

其中, 位 7: 保留位; 位 6: 接收错误中断使能位; 位 5: 软件复位位(低电平有效), 写入 0 来初始化 SCI 状态机和操作标志至复位条件, 系统复位后写入 1 来重新使能 SCI; 位 4: 保留位; 位 3: SCI 发送器唤醒方法选择位; 位 2: SCI 休眠位; 位 1: SCI 发送使能位; 位 0: 接受使能位。

串行通信接口控制寄存器 2(SCICTL2)用来反应发送准备好和发送缓冲器空, 及使能间断检测和 SCITXBUF 中断, 其各位设置如表 3-5 所示。

表 3-5 SCICTL2 各位设置

7	6	5	4	3	2	1	0
TXRDY	TX EMPTY	保留位			RX/BK INT ENA		TX INT ENA
R_1	R_1	RW_0			RW_0		RW_0

其中, 位 7: 发送缓冲器准备好标志位; 位 6: 发送器空标志位; 位 5~2: 保留位; 位 1: 接收缓冲器/间断中断使能位; 位 0: 发送器中断使能位。

串行通信接口使用 16 位波特率选择寄存器, 数据传送的速度可以被编程为 65000 多种方式。不同通信模式下的串行通信接口异步波特率由下列方法决定:

(1)BRR=1 到 65535 时的 SCI 异步波特率为: $\text{SYSCLK}/[(\text{BRR}+1)\times 8]$;

(2)BRR=0 时 SCI 波特率为: $\text{SYSCLK}/16$ 。

BRR 等于波特率选择寄存器的 16 位值。若系统时钟频率 $\text{SYSCLK}=24\text{MHz}$, 要用 9600bps 进行 RS232 通信, 则由上式可知: $\text{BRR}=[2400000/(9600\times 8)]-1=311.5\approx 138\text{H}$, 所以波

特率选择器设置为 SCIIHBAUD=01H, SCILBAUD=38H。

针对以上各寄存器的初始化, 在程序中实现过程如下:

```

LACL  MCRA
OR    #03H
SACL  MCRA           :配置串行口引脚为基本功能: TXD、RXD
LDP   #0E01H
SPLK  #000FH, SCICCR  :地址位唤醒模式, 8 位数据, 1 位停止位, 无奇偶校验
SPLK  #0007H, SCICTL1 :接收、发送、内部时钟使能, SLEEP=1, SW RESET=0
SPLK  #0002H, SCICTL2 :接收中断使能, 发送中断禁止
SPLK  #0001H, SCIHBAUD
SPLK  #0038H, SCILBAUD :波特率为 9600
SPLK  #0027H, SCICTL1 :串口初始化, 重新使能 SCI

```

3.3.2 串行通信的程序实现

SCI 的接收器在接收到起始位后开始操作, 有效地起始位由连续的 0 组成, 长度为 4 个 SCICLK 周期, 如果任意位不为 0, 则处理器的启动结束, 并开始寻找另一个起始位。对于起始位后的各位, 处理器对该位的中间进行三次采样来决定位值, 采样发生在第 4、5 和第 6 个 SCICLK 周期, 由于接收器本身能按帧进行同步, 所以外部的发送或接收不必使用同步串行时钟 SCICLK。SCI 接收操作和发送操作所采用的时序如图 3-4 和图 3-5 所示, 图中发送和接收的每个字符包括 6 个位。

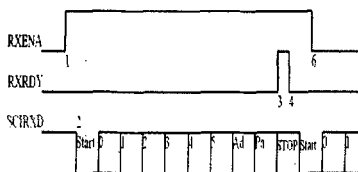


图 3-4 SCI 的数据接收时序

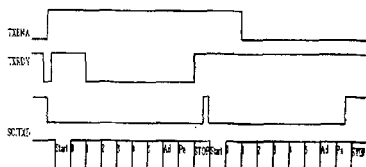


图 3-5 SCI 的数据发送时序

图 3-4 中, 数据由 SCIRXD 引脚进入, RXRDY 置 1 表示接收到新字符, 位 RX ENA 使能或禁止 SCI 接收, 当 RX ENA=0 时, 数据不被送到缓冲寄存器中。图 3-5 中, 数据由 SCITXD 引脚进入, TXRDY 变低表示缓冲器不空, TXRDY 置 1 表示可以写入新字符, 位 TX ENA 使能或禁止 SCI 发送器操作。

要正确实现 SCI 通信, 除一般串行通信设置外, 还必须正确设置 SLEEP 位(SCICTL1 第 2 位), 方法如下: 上电复位时, 将 DSP 的 SLEEP 位设为 1, 使得它们检测到地址字节才被中断。当上位机下达指令时, 发送的是地址字节, DSP 发生接收中断, 对接收的地址判断: 若上位机以地址 AAH 呼叫, 则 DSP 立即调用发送程序传送数据; 若上位机以地址 ABH 呼叫, 则 DSP 就置 SLEEP 位为 0。再次发生接收中断时, 由于 SLEEP 位为 0, DSP 直接接收数据和校验和, 并对数据进行校验。校验结果与校验和比较, 如正

确，则反馈“BBH”；如不同，则反馈“BCH”，要求重发^[33]。其中断服务程序流程如图 3-6 所示。

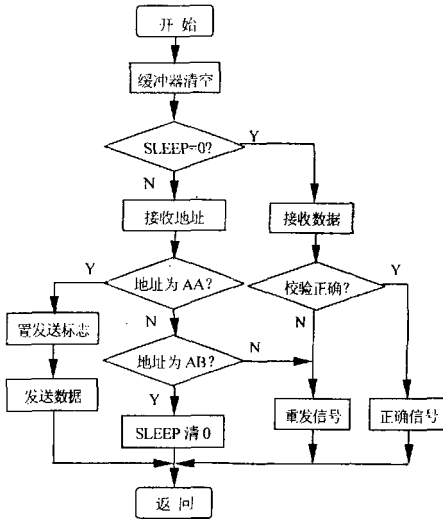


图 3-6 SCI 中断服务程序流程图

数据从引脚 SCIRXD 接收，被送至 RXSHF，经过移位后被传送到 SCI 接收器仿真缓冲寄存器(SCIRXEMU)和缓冲寄存器(SCIRXBUF)。传送完成时，RXRDY(SCIRXST.6)标志位置位，表明 CPU 可以读取数据。如果 RX/BK INT ENA 也被置位，将引发接收中断。读 SCIRXBUF 时，RXRDY 标志位被清零，SCIRXBUF 可由系统复位来清除。数据接收程序如下所示：

```

SCI_RX_ISR: LDP #DP_PFI
            MAR    *,AR1
            BIT    SCICTL1,BIF2
            BCND   RXD_DATA,NTC    :SLEEP=0, 接收数据
            LACC   *                :读入地址
            SUB    #0AAH
            BCND   TXD_FLAG,EQ     :接收到的地址为 AAH, 则发送数据
            SUB    #0001H
            BCND   SCI_RX_END,NEQ  :地址错误, 退出中断
            SPLK   #0033H,SCICTL1  :地址为 ABH, 则清 SLEEP=0 :表示准备接收数据
            B      SCI_RX_END       :退出
            RXD_DATA: LACC *, AR3   :读入数据
            SACL   *,AR0           :保存数据
            LAR    AR0,#RXD_PTR
    
```

```

ADRK  #N
MAR   *, AR3
CMPR  00
BCND  SCI_RX_END.NTC :判是否接收完
LAR   AR3.#RX_PTR   :恢复接收的数据指针
SPLK  #0037H.SCICTL1 :置 SLEEP=1 表示准备接收地址

```

要发送的数据被写入到发送缓冲寄存器(SCITXBUF)中, 数据从该寄存器传送到发送移位寄存器(TXSHP), 同时设置 TXRDY 标志位, 这表明可以向 SCITXBUF 写入新数据。数据发送程序如下所示:

```

TXD_DATA: MAR   *.AR0
        LAR   AR0,#TXD_PTR
        ADRK  #N+1      :发送 N 个数据
        MAR   *,AR4
        LACC  *+        :读数据
        CMPR  00
        BCND  TXD_DATA_END.TC :判数据发送完?
        MAR   *,AR2
        SACL  *,AR4      :数据送 SCITXBUF 寄存器
        B     TXD_DATA
TXD_DATA_END: MAR *.AR4
        LAR   AR4,#TXD_PTR :数据放入当前辅助寄存器

```

3.3.3 通信数据的冗余校验

在控制现场中, 由于环境影响, 串行通信中出现错误是难免的, 如波特率误差、通信距离的远近、通信环境的优劣、传输线路的屏蔽、接口电路性能、通信软件设计等均对串行通信的数据准确性有着不同程度的影响。既然通信系统的传输差错不可避免, 那么通信系统必须具备识别这种差错的能力, 保证系统准确通信。本系统的通信涉及到地址和数据信息, 地址信息是“AAH”、“ABH”, 控制 DSP 发送或接收数据的指令, 数据信息是机器人的移动速度和方向。这些信息的错误是传统的错误形式, 常用的纠错方法均可适用。但是考虑到的系统的实时性, 当错误出现时, 不能频繁要求上位机重新发送。

为减少初始设置中没有奇偶校验的不足, 提高串行通信的准确性, 本系统采用副本冗余的校验方法。上位机发送数据时, 同时发送一个副本, 该副本为相应数据的反码, 且正本和副本均有校验和, 校验和利用奇偶校验得到。上位机将数据正本、正本校验和、数据副本、副本校验和依次发送, 并等待反馈信号。上位机发送的数据长度为固定 2 字节, 当发送地址字符时, 后一个字节为 0, 冗余后为 8 个字节。

当 DSP 接收完数据后, 首先对数据正本进行校验, 将结果与校验和比较, 如相同, 则将其作为正确数据, 向上位机发送正确信号“BBH”; 如不同, 则校验数据副本。如果

数据副本校验正确, 则取其作为正确指令, 并向上位机发送“BBH”; 如数据副本也不正确, 则向上位发送“BCH”, 要求重发。上位机发送数据后, 将有一个等待时限, 如果超时未收到反馈信号(BBH 或 BCH), 将自动重新发送数据。

可见, 冗余后的通信量没有明显加大, 而且仅在数据正本与副本同时错误时才要求上位机重发数据, 减少了通信次数, 可以满足系统的实时性要求。这种校验方式的不足在于, 无法检测通信数据的偶数个位同时错误, 也没有纠错能力。

3.4 模数转换程序

ADC 模块需要设置的寄存器包括 2 个控制寄存器 ADCTRL1 和 ADCTRL2、最大转换通道寄存器(MAXCONV)和输入通道选择排序控制器(CHSELSEQn)^[34]。

控制寄存器 1 涉及到 ADC 模块复位、预定标系数、时钟和参考电压选择, 各位设置意义如表 3-6 所示, 各位复位后均为 0。

表 3-6 ADCTRL1 各位设置

15	14	13	12	11	10	9	8
保留位	RESET	SOFT	FREE	ACQPS3	ACQPS2	ACQPS1	ACQPS0
7	6	5	4	3	2	1	0
CPS	CONTRUN	INTPRI	SEQCASC	CALENA	BRGENA	HI/LO	STESTENA

表中, 位 15: 保留位; 位 14: 复位位, 置 1 为针对整个 ADC 模块的主动复位; 位 13~12: 决定仿真悬挂时 ADC 模块的工作情况; 位 11~8: ADC 时钟的预定标系数选择; 位 7: 转换时钟预定标位; 位 5: ADC 中断请求优先级; 位 4: 级连排序器工作方式位; 位 3: 偏差校准使能位; 位 2~1: 参考电压选择位; 位 0: 自测试使能位。

控制寄存器 2 涉及到 ADC 模块复位、预定标系数、时钟和参考电压选择, 各位配置如表 3-7 所示, 各位复位后均为 0。

表 3-7 ADCTRL2 单元的各位设置

15	14	13	12	11	10	9	8
EVB SOC SEQ	RSTSEQ1/ STRTCAL	SOC SEQ	SEQ1 BSY	INTENASEQ1 (Mode1)	INTENASEQ1 (Mode0)	INT FLAG SEQ1	EVA SOC SEQ1
RW_0	RS_0	RW_0	R_0	RW_0	RW_0	RC_0	RW_0
7	6	5	4	3	2	1	0
EXT SOC SEQ1	RSTSEQ2	SOC SEQ2	SEQ2 BSY	INTENASEQ2 (Mode1)	INTENASEQ2 (Mode0)	INT FLAG SEQ2	EVB SOC SEQ2
RW_0	RS_0	RW_0	R_0	RW_0	RW_0	RC_0	RW_0

表中, R 为可读, W 为可写, S 仅为设置, C 为清除, _0 为复位后的值。位 15: 级连排序器使能位; 位 14: 复位排序器 1/启动校准转换方式位; 位 13: 启动 SEQ1 转换位; 位

12: SEQ1 忙状态位; 位 11~10: 对 SEQ1 中断方式使能位; 位 9: SEQ1 中断标志位; 位 8: EVA 对 SEQ1 产生 SOC 信号的屏蔽位; 位 7: 外部信号对 SEQ1 的启动转换位; 位 6: 复位排序器 2; 位 5: 启动 SEQ2 转换位; 位 4: SEQ2 忙状态位; 位 3~2: 对 SEQ2 中断方式使能位; 位 1: SEQ2 中断标志位; 位 8: EVB 对 SEQ2 产生 SOC 信号的屏蔽位。

MAXCONV 的位 6~0 决定了一次自动转换的通道个数, 对 SEQ1 操作使用位 2~0, 对 SEQ2 操作使用位 6~4, 对 SEQ 操作使用位 4~0, 位 15~7 为保留位。4 个 CHSELSEQn 中每一个 4 位的域用来选择转换通道中的任一个。

对以上寄存器的初始化设置的程序实现如下:

```
LDP    #011H
SPLK  #1000H,ADCTRL1    ;整个 ADC 复位
NOP
SPLK  #3010H,ADCTRL1    ;设置控制寄存器 1, 自由运行, 预定标系数 0, 级进模式
                                ;位 2 和位 1 参考电压为 VREFLO
SPLK  #2000H,ADCTRL2    ;启动 SEQ1 转换位, 中断不使能
SPLK  #0001H, MAXCONV    ;2 通道
SPLK  #10H, CHSELSEQ1    ;通道 0 和通道 1
```

对 2 个通道 AD 转换程序如下所示:

```
ADCINT ISR CLRC SXM
LDP    #DP_SARAM2
LAR    AR1, ADCOUNT
LAR    AR0, #1          ;转换通道数
LAR    AR2, #RESULT0
MAR    *.AR2
ADC1:  LACC  *.10, AR1
SAC11  *
ADRK  #32
MAR    *.AR0
BANZ  ADC1, *, AR2
LDP    #DP_PF2
LACL  ADCTRL2
OR    #4000H          ;复位 SEQ1
AND  #0FFDFH          ;清 INT FLAG SEQ1
SACL  ADCTRL2
```

ADC 的转换结果放在结果寄存器 ADCFIFO1 和 ADCFIFO2 中, 这是一个 2 级先入先出栈, 用来包含一个模拟输入信号转换后得到的 10 位数字结果, 它们是只读寄存器, 复位时被清零。

3.5 FLASH 引导程序

DSP 系统的引导装载是指在系统加电后,系统自行将一段存储在非易失性存储器中的代码移植到 DSP 内部的高速 RAM 中并执行的过程。FLASH 存储器是一种高密度、非易失性的电可擦写存储器,而且单位存储比特的价格比传统的 EPROM 要低,LF2407 片内集成了 32K 字的 FLASH 程序存储器,可以满足系统引导装载的实现。

在系统加电之前,必须先将引导程序 and 用户程序写入 FLASH 中。当系统加电之后,一般首先在 FLASH 中运行引导程序,并由其自行完成对用户程序的移植操作,然后再由 DSP 高速运行移入到 DSP 片内的用户程序。编程时,除了可以利用专用的硬件编程器实现对 FLASH 的编程之外,FLASH 通常还支持 DSP 软件编程以实现同样的功能,利用 TI 公司的 THE FLASH SERIAL BOOT LOADER 工具,通过 RS-232 串行接口对 FLASH 进行编程,仅需标准 PC 机和 LF2407 的扩展串行口便可实现 FLASH 中用户代码的更新和修改。

1 FLASH 存储器编程

TMS320LF240x 系列片内 FLASH 通过 PC 机的在线编程方法有两种^{[38][39]}:一种是利用 DSP 自带的 JTAG 接口(Joint Test Action Group)从 PC 机并口或专用硬件控制器实现编程(JTAG 编程方式);另外一种是利用 DSP 的串行通信接口(SCI)通过 RS232 从 PC 的串口实现编程(串口编程方式)。前者需要使用 JTAG 接口控制器,由控制器提供数据、地址及控制信号,在程序调试完毕后烧写到片内 FLASH 中。后者需要根据 FLASH 支持的指令集编写程序,编译后分段下载到 DSP 的 RAM 中,再转移到 FLASH 存储器中。

在串口编程模式下,需要用到 DSP 的 BOOT LOADER 功能:当 BOOT-EN/XF 引脚为高电平并且 DSP 运行于微控制器方式(MP/MC 为低电平)时,DSP 执行片内 FLASH 程序,系统正常运行。当 BOOT-EN/XF 为低电平、编程电压引脚为+5V,并且 MP/MC 为低电平时,DSP 执行片内 ROM 加载程序,并通过串行通信接口(SCI)从主机(PC 机)上下载用户代码。此时,编程程序可利用 ROM 提供的功能将编译好的目标文件逐块装载到片内 RAM,然后把 FLASH 读写控制程序和监控程序装载到片内的另一区域,最后运行片内监控程序通过读写控制程序逐字节把目标程序写入 FLASH。

要写入 FLASH 的程序可通过 CCS 完成,经编译、链接后生成二进制的 COFF 格式文件*.out,它不仅包含了程序代码,而且还包含了文件头、符号表、段地址、初始化段入口等其他的信息,但是 FLASH 不支持这种模式,因此不能够直接写入 FLASH。此时,主要有两种方法进行 FLASH 烧写。

第一种方法是 will 将 COFF 格式文件转换为 HEX 格式。在 CCS2000 环境下,可利用 dsphex 命令直接转换,得到文件*.hex。HEX 命令先对 COFF 文件中的程序代码(包括初始化数据等)进行相应的分组,然后再根据数据宽度、存储器宽度和 ROM 宽度分别写入不同的几个输出文件中。通过选择不同的参数,得到不同格式输出文件。转换后的文件作为用户代码被 boot loader 通过串口写入 DSP 的 FLASH 中。

第二种方法是利用 GEL 文件写入 FLASH，操作顺序如下：

(1)使用 File->Load Program 载入需要烧写的文件(*.out)。

(2)使用 File->Data->Save...存储刚载入的程序数据到主机文件中(*.dat)，指定文件名后，输入数据的起始地址，数据长度，内存页类型。此时内存页类型选择 Program。

(3)使用 File->Load GEL...加载对应 GEL 文件，加载成功后在 CCS 系统菜单中的 GEL 下面出现 Flash 编程及子项 FlashClear, FlashErase, Write2Flash。

(4)顺序使用 GEL->Flash 编程->FlashClear, GEL->Flash 编程->FlashErase 对 Flash 进行擦除。FlashClear 后 Flash 中所有数据为 0, FlashErase 后 Flash 中所有数据为 1。

(5)使用 GEL->Flash 编程->Write2Flash, 系统提示输入要烧写的文件、数据长度。此处输入的烧写文件是第 2 步存储的数据文件及数据长度，如文件 sample.dat 存在 C:\flash 中，则输入文件名时使用格式为“C:\flash\sample.dat”，引号必须。数据输入完成后点击 Execute 按钮，烧写工作完成。

工作完成后可把 PC 值设为 0，按键 F5 执行来验证烧写工作的成败。

2 串口编程的注意事项

在用户代码被写入 FLASH 后, Boot Loader 会自动将 FLASH 中的 0x3E00 至 0x3FFF 空间中的 Boot Loader 代码更新, 供下次再通过串行口写入用户代码时使用。因此必须将 0x4000 作为用户代码的入口。

对 FLASH 编程结束后, 需要进行保护, 以防误操作引起内容受损。在编程过程中, 编程引脚 V_{CCP} 是接到 V_{DD} 上的, 在编程结束后, 把 V_{CCP} 引脚接地, 则阵列中的内容不会被改变。另外, 模块中的控制寄存器也提供了一些保护措施: 通过把 SEG_CTR 寄存器中的段使能位 SEG0-SEG7 复位, 可防止段内容被改写; 通过把 EXE、KEY0 和 KEY1 位复位, 可保护阵列内容不被改写; WDATA 寄存器在擦除操作前必须写入 FFFFH, 如果 WDATA 的内容不是 FFFFH, 则可防止阵列的内容被改写。

LF2407 引脚电平不兼容 RS-232 串行接口, 硬件连接时必须要进行 TMS320LF2407 与标准 RS-232 串行接口间的电平转换, 如图 2-14 所示。

3.6 主程序

主程序是控制程序的核心, 它主要完成系统的初始化, 各标志位的位置与复位、控制指令的转换、计数器周期寄存器初值的计算、接收反馈信号以及计算航迹推算的数据等功能。

3.6.1 系统初始化设置

程序开始运行时要进行初始化, 涉及到程序整体的编译、运行环境, 只有正确的初

始化各寄存器，系统才能正确中断和读写数据，主要初始化设置如下：

```

SETC   INTM           ;关闭总中断
CLRC   SXM           ;清除符号扩展模式
CLRC   OVM           ;复位溢出模式
CLRC   CNF           ;B0 被配置为数据存储空间
LDP    #0E0H
SPLK   #81FEH, SCSR1 ;CLKIN=6 M, CLKOUT=24 M
SPLK   #06FH, WDCR   ;不使能 WDT, WD 预定标为 64
LDP    #0
SPLK   #0000H, IMR   ;不使能所有中断
SPLK   #0FFFFH, IFR  ;清全部中断标志
CLRC   INTM         ;开总中断
SPLK   #0h, GPRO
OUT    GPRO, WSGR

```

为提高程序的抗干扰能力，程序中加入假中断程序，当系统发生干扰中断时即调用该程序，复位看门狗定时器并回主程序。

```

PHANTOM KICK_DOG      ;复位看门狗
RET

```

3.6.2 正交编码脉冲的计数

在两个事件管理器中，当 QEP 电路被使能(禁止捕获功能)，定时器 2 对引脚 CAP1/QEP1 和 CAP2/QEP2，定时器 4 对引脚 CAP4/QEP3 和 CAP5/QEP4 上的脉冲数目和频率分别解码和计数^[33]。此时正交编码器脉冲作为时钟源，定时器设置为外部时钟，定向增/减计数方式。如果引脚 CAP1/QEP1(对于 EVB 是 CAP4/QEP3)输入是先导脉冲，则计数器进行增计数；相反，则计数器进行减计数。通用定时器 2 和 4 从计数器中当前值开始计数，因此需在使能 QEP 电路前将所需的值装载到选用的定时器的计数寄存器中。

当使用正交编码脉冲作为时钟时，此时通用定时器的定向增/减与普通的定向增/减不同。用于正交编码脉冲操作的通用定时器增计数至周期值时，定时器不会停止，而是继续计数至计数方向变化为止。如果增计数至最大值 FFFFH 时，计数器将返回至 0；如果减计数至 0 时，计数器将返回至 FFFFH。定时器的周期、下溢、上溢和比较当匹配发生时将产生中断标志，如果中断没有被屏蔽，则将产生中断请求信号。

为使能 QEP 电路，需要设置并使能通用定时器 2 和 4，设置 CAPCONA 和 CAPCONB 寄存器。通用定时器 2 的各位意义与表 3-2 所示相同，其初始化设置应为：

```

SPLK   #0, T2CNT      ;设置定时器计数器
SPLK   #0183CH, T2CON ;定时器计数使能,定向增/减计数;预定标系数 0
                          ;时钟为正交编码脉冲;保留计数值;比较禁止

```

CAPCONA 和 CAPCONB 寄存器以使能 QEP 电路，其各位配置如表 3-8 和表 3-9 所示^[40]。

表 3-8 CAPCONA 寄存器各位配置

15	14	13	12	11	10	9	8
CAPRES	CAPQEPN		CAP3EN	Reserved	CAP3TSEL	CA12TSEL	CAP3OADC
RW_0	RW_0	RW_0	RW0	RW_0	RW_0	RW_0	RW_0
7	6	5	4	3	2	1	0
CAP1EDGE		CAP2EDGE		CAP3EDGE		Reserved	
RW_0	RW_0	RW_0	RW0	RW_0	RW_0	RW_0	RW_0

表中, R 为可读, W 为可写, _0 为复位后的值。位 15: 写入 0 清除所有 CAP 和 QEP 寄存器; 位: 14-13 写入 11 使能 QEP 功能, 禁止 CAP1 和 CAP2; 位 12: 写入 0 禁止 CAP3; 位 11 保留位; 位 10: 为 CAP3 使用的定时器选择位; 位 9: 写入 0, CAP1 和 CAP2 选择定时器 2; 位 8: 设定 CAP3 中断开始 AD 转换; 位 7-6: 写入 11 对 CAP1 信号两个边沿检测; 位 5-4: 写入 11 对 CAP2 信号两个边沿检测; 位 3~2: 写入 11 对 CAP3 信号两个边沿检测; 位 1-0: 保留位。

表 3-9 CAPCONB 寄存器各位配置

15	14	13	12	11	10	9	8
CAPRES	CAPQEPN		CAP6N	Reserved	CAP6TSEL	CA45TSEL	CAP6OADC
RW_0	RW_0	RW_0	RW0	RW_0	RW_0	RW_0	RW_0
7	6	5	4	3	2	1	0
CAP4EDGE		CAP5EDGE		CAP6EDGE		Reserved	
RW_0	RW_0	RW_0	RW0	RW_0	RW_0	RW_0	RW_0

QEP 电路在程序中初始化设置为:

SPLK #00F0H, CAPCONA: 使能 QEP1 和 QEP2, 禁止捕获单元 1~3, 检测两个边沿

SPLK #00F0H, CAPCONB: 使能 QEP3 和 QEP4, 禁止捕获单元 4~6, 检测两个边沿

3.6.3 里程计信息

DSP 根据每周期的控制量, 并结合感知子系统的光纤陀螺仪和倾角传感器的角度变换, 计算里程计信息, 包括机器人在各个坐标轴方向的位移量。每个控制周期(50ms)内, DSP 计算左右前轮角位移平均值(Δd)作为车体位移, 即:

$$\Delta d = (\Delta \alpha + \Delta \beta)r/2 \quad (3-1)$$

车体平面移动时, 里程计信息的计算公式为:

$$\begin{aligned} x(k) &= x(k-1) + \Delta d \cos \phi \cos \theta \\ y(k) &= y(k-1) + \Delta d \cos \phi \sin \theta \\ z(k) &= z(k-1) + \Delta d \sin \phi \end{aligned} \quad (3-2)$$

其中, Δd 为该时段车体的位移; $\Delta \alpha$ 、 $\Delta \beta$ 分别为左右前轮在一个检测周期内转过的弧度, r 为车轮半径, θ 为光纤陀螺提供的航向角度; ϕ 为倾角传感器提供的俯仰角度。

上位机(PC 机)建立三维环境坐标系和车体坐标系(包括机器人的位置(x, y, z)和姿态(α, β)), 根据 DSP 提供的里程计信息进行航迹推算。

3.6.4 主程序流程及运行结果

根据主程序功能,其主要流程如图 3-7 所示。系统启动后,只有接收到给定运行速度后才开始动作。在运行过程中,如果接收到控制指令,则立刻停止输出,确定新的转向电平和脉冲频率,随即输出新的控制信号。

当电机转速在 300 转/分时,经减速装置,光电编码器检测到的速度曲线如图 3-8 所示,位移曲线如图 3-9 所示,由图可见,步进电机有较小振荡。此时,机器人前进速度为 0.31m/s,电机控制器细分数为 5,步进角 0.36° ,每秒步进脉冲为 5kHz,采用 DSP 直接输出脉冲方式。

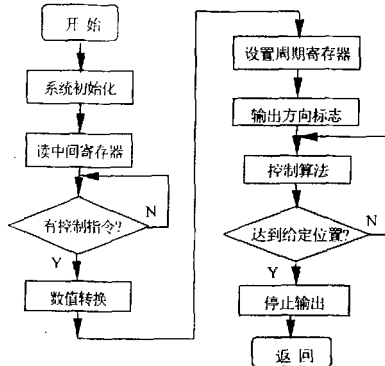


图 3-7 主程序流程图

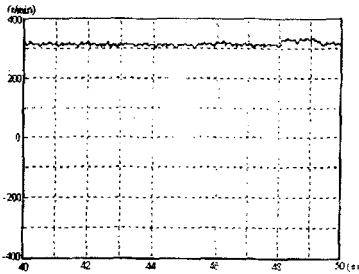


图 3-8 步进电机实测速度曲线图

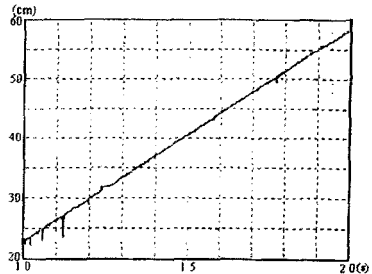


图 3-9 步进电机位移曲线

第四章 步进电机的速度控制

4.1 步进电机的数学模型

4.1.1 升降速曲线的选择

步进电机在变速运行时，既要克服负载转矩，同时也要克服变速所引起的系统惯性转矩。由步进电机的矩频特性可知，脉冲频率越高，电磁转矩就越小；同时，角加速度越大，引起的系统惯性转矩越大，故其直接启动频率必须在一个有限值下，如果启动频率大于这一有限值，步进电机就会出现失步现象。同样，步进电机不能在高速运行状态下突然停止，否则由于惯性作用会出现过冲，需逐步降低脉冲频率直到能够停止的速度。因此在整个加速(减速)过程中，步进电机的角加速度应该随着转子角速度的变化而变化，使步进电机在不失步条件下，以最短的时间加速(减速)到给定速度。另外，应尽量缩短启动加速和停止减速时间，提高其快速性。因此，选择合理的运行规律曲线，成为步进电机速度控制的关键。

常见的升降速曲线主要有三种：图4-1a所示为阶梯升降速方式，即步进电机的转速每跃升一个台阶后将恒速运转一段时间。这种方法的缺点是在恒速阶段没有加速，而且在高频段加速台阶高，步进电机在速度阶跃时会发生失步。另一种升降速方式如图4-1b所示，这种升速方法的加速度是恒定的，缺点是未充分考虑步进电机输出力矩随速度变化的特性，在高速时会发生失步。图4-1c所示为定时常数递减的方法实现升速的曲线，缺点是低频时升速太慢，而高速时升速太快^[41]。

由以上可知，图4-1所示的升降速曲线都不是理想的运行曲线，因此应该在研究步进电机的运动特性的基础上设计其升降速运行曲线。由步进电机的动态特性，可知其惯性扭矩为式(4-1)所示：

$$J\varepsilon = J \frac{d\omega}{dt} = T_e - \beta\omega - T_l \quad (4-1)$$

式中： J 是系统总转动惯量； ω 是电机的角速度； β 是机械阻尼和电磁阻尼系数； ε 是角加速度； T_l 是摩擦阻力矩和负载力矩； T_e 是步进电机的电磁转矩。

由上述方程和其它因素所决定，步进电机的转矩在驱动脉冲的频率较低时比较大，随着频率的上升近似于线性下降。惯性扭矩 $J\varepsilon$ 应小于最大电磁扭矩 T_e 。在升速阶段，角加速度 ε 应尽可能大些，以提高系统的快速性。但为了减小对系统的冲击， ε 不应突变。 ε 从0线性增加到 f_1 ，随后保持不变，当频率增加到 f_2 时 ε

线性递减, 当频率达到 f_m 时 ε 减到0。角加速度 ε 的变化规律如图4-2所示, 符合步进电机矩频特性的升速曲线如图4-3所示。

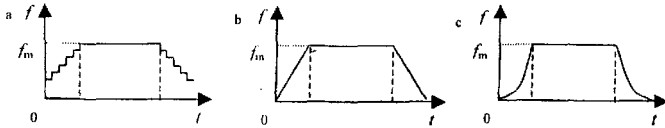


图 4-1 常见的升速曲线

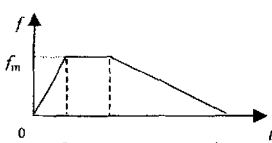


图 4-2 ε 的变化规律

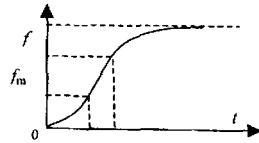


图 4-3 步进电机的升速曲线

在步进电机降速的初始阶段, 如果其运行频率很高, 则其输出转矩很小。因此在这一阶段, 步进电机的角加速度 ε (绝对值) 应当小; 随着运行频率的下降, 其输出转矩增加, 相应的速度随时间的变化率也应增加。因此, 步进电机的降速曲线应该对称于其升速曲线, 是升速曲线 (图 4-3) 的镜像。

这种升降速曲线能充分利用步进电机的有效转矩, 快速响应性好, 缩短了升降速的时间, 并可防止失步和过冲现象, 可方便地在微处理器控制的步进电机驱动器上实现, 加/减速过程平稳而快速。

4.1.2 步进电机的数学模型

根据两相混合式步进电机的电气与电磁回路结构, 其线性等值回路如图 4-4 所示。二相混合式步进电动机的仿真模型可归结为二相绕组回路的电压方程和转子的运动方程, 如式(4-2)所示:

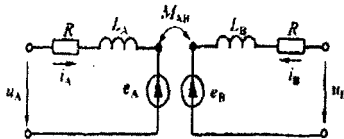


图 4-4 两相混合式步进电机等值电路

$$\begin{aligned}
 J \frac{dw}{dt} + Bw + T_l &= T_e \\
 U_A &= R_A i_A + L_A \frac{di_A}{dt} + M_{AB} \frac{di_B}{dt} + e_A \\
 U_B &= R_B i_B + L_B \frac{di_B}{dt} + M_{AB} \frac{di_A}{dt} + e_B
 \end{aligned}
 \tag{4-2}$$

其中, e_A 、 e_B 为 A、B 绕组中的运动电势; U_A 、 U_B 为端电压; R_A 、 R_B 为 A、B 绕组的线圈电阻; i_A 、 i_B 为绕组电流; L_A 、 L_B 为绕组的自感; M_{AB} 为绕组的互感, 通常两相步进电动机相间互感较小, 可以忽略不计。

根据上述运动方程和步进电机的动态特性, 步进电机单相通电时, 角位移响应的传递函数为式(4-3)所示:

$$G(s) = \frac{Kc}{Js^2 + (\frac{KmKe}{R} + B)s + Kc} \quad (4-3)$$

式中, K_c 、 K_e 、 K_m 分别为常数、电动势系数、转矩系数。其动态结构图如图 4-5 所示^[42]。以式(4-4)为例, 当给定单步脉冲时, 步进电机的角位移响应的仿真结果如图 4-6 所示, 速度曲线结果如图 4-7 所示。

$$G(s) = \frac{1}{0.8s^2 + 0.15s + 1} \quad (4-4)$$

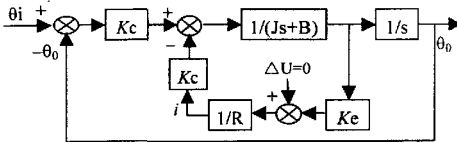


图 4-5 步进电机动态结构图

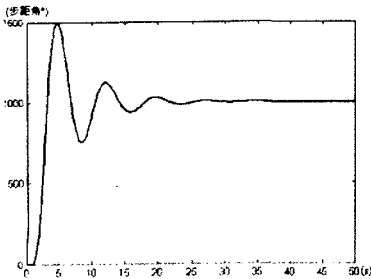


图 4-6 单步脉冲角位移响应曲线

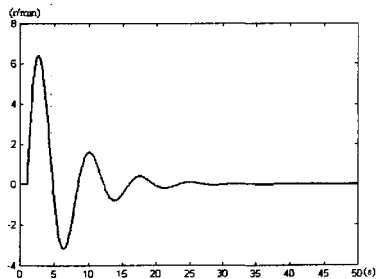


图 4-7 单步脉冲速度响应曲线

通过比较仿真结果和实测结果, 可见仿真结果与实验结果十分接近, 证明了仿真的有效性, 可用此仿真模型对其它控制方式进行定性仿真。

4.2 PID 控制器的应用

4.2.1 PID 参数初值的选择

在控制系统中最常用的控制规律是 PID 控制, 它是一种线性控制器, 根据

给定值 $r(t)$ 与实际值 $y(t)$ 构成控制偏差, 将偏差的比例、积分和微分通过线性组合构成控制器。其控制规律如式(4-5)所示:

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4-5)$$

式中, K_p 是比例系数, T_i 为积分时间常数, T_d 为微分时间常数。在计算机控制系统中, 使用的是数字 PID, 其传函形式为

$$U(s) = (K_p + \frac{K_i}{s} + K_D s) E(s) \quad (4-6)$$

其中, K_P 、 K_I 、 K_D 分别为比例增益、积分增益和微分增益。该式的离散时域表示如式(4-7)所示:

$$u(k) = u(k-1) + K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i T e(k) + \frac{K_D}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (4-7)$$

PID 参数 K_P 、 K_I 、 K_D 由预整定得到, 整定方法有动态特性参数法、衰减曲线法、Ziegler-Nichols 经验公式等。本文采用文献[43]的稳定边界法进行整定, 该方法是基于纯比例控制系统临界振荡试验所得数据, 利用一些经验公式求取 PID 控制器参数, 可在不知道对象数学模型情况下确定参数值, 主要过程如下:

(1) 将 K_I 、 K_D 设为 0, K_P 置较小的值, 使系统能投入稳定运行;

(2) 逐渐增大 K_P , 直到系统出现等幅振荡, 即临界振荡, 记录此时临界振荡增益 K_{PK} 和临界振荡周期 T_K ;

(3) 按经验式(4-8)计算参数的整定值

$$\begin{aligned} K_P &= 0.6 K_{PK} \\ K_I &= 1.2 K_{PK} / T_K \\ K_D &= 0.075 K_{PK} T_K \end{aligned} \quad (4-8)$$

利用以上方法得到参数值: $T_K = 21.5\text{s}$ 、 $K_{PK} = 12.5$, 由上式计算得: $K_P' = 7.5$, $K_I' = 0.7$, $K_D' = 25$ 。该参数值仅用于系统初始控制阶段, 可根据控制效果不断修正, 为加快系统响应速度, 提高实时性, 可适当增大 K_P 和 K_D , 使上升时间减小, 过渡过程加快。

4.2.2 PID 控制器的实现

程序用到的参数: 给定值为速度 VR , 测量值为 VY , 输出控制量 U , PID 参数为 K_P 、 K_I 、 K_D , 误差 $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 、 $e(k-2)$, 前一时刻控制量 $U(k-1)$, 中间单元 $TMP1$ 、 $TMP2$ 和 $TMP3$ 。根据公式(4-7)进行控制, 程序实现过程如下:

```

LACL VR ;读给定值
SUB VY ;减去测量值
SACL VE2 ;e(k) = VR - VY
SUB VE1 ;e(k-1)
SACL TMP1 ;Δe(k) = e(k) - e(k-1)
SUB VE1
ADD VE0 ;e(k-2)

```

```

SACL  TMP3          ; $\Delta e(k) - \Delta e(k-1) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)$ 
LT     KP
MPY    TMP1
PAC    PAC           ; $K_p * \Delta e(k)$ 
RPT    #4
SFL    SFL           ; $K_p * \Delta e(k)$ 
SACH   TMP1, 1      ; $K_p * \Delta e(k)$ 
LT     KI
MPY    VE2
PAC    PAC           ; $K_i * e(k)$ 
RPT    #4
SFL    SFL           ; $K_i * e(k)$ 
SACH   TMP2, 1
LT     KD
MPY    TMP3
PAC    PAC           ; $K_d * \Delta e(k) - \Delta e(k-1)$ 
RPT    #4
SFL    SFL           ; $K_d * \Delta e(k) - \Delta e(k-1)$ 
SACH   MP3, 1       ; $K_d * \Delta e(k) - \Delta e(k-1)$ 
LACL   U             ; $u(k-1)$ 
ADD    TMP1
ADD    TMP2
ADD    TMP3
SACL   U             ; $u(k)$ 

```

程序结束时需要将 VE2 和 VE1 的值保存至 VE1(对应 $e(k-1)$)和 VE0(对应 $e(k-2)$)单元,以便下次控制需要。

4.3 速度模糊控制器

模糊控制以模糊集合为基础,利用经验规则进行模糊推理,对生产过程进行自动控制。这种控制策略无需知道被控对象的数学模型,对被控对象的参数变化不敏感,有较强的鲁棒性,对外界干扰有较强的抑制能力,因此对那些时变、非线性或无法获得精确的数学模型的复杂系统,具有良好的控制效果。步进电机的内部各变量高度非线性且相互耦合,难以用简单的数学模型表述,采用经典控制理论的步进电机控制系统难以达到满意的控制效果,模糊控制是一种合适的选择^[44]。同时,系统采取模糊控制时不会出现超调,升降速曲线平滑,可以有效防止步进电机的振荡和失步问题,提高了输出转矩。

4.3.1 模糊控制器的设计

1 模糊控制器的结构

在模糊控制过程中,DSP 根据控制指令(速度和方向)计算控制量,作为模糊控制器的给定目标 r ,光电编码器检测到的电机转速作为反馈输入,计算得到转速偏差 e 和偏差变化率 ec ,经量化和模糊化后作为模糊控制器的输入信号,模

模糊判决后输出模糊控制量 U ，解模糊后作为电机转速的增量 u ，与前周期转速相加后输出。模糊控制器采用两输入单输出结构，图 4-8 给出了速度模糊控制器的系统结构框图。图中， r 为系统给定； $y(k)$ 为电机转速的反馈值； E_e 、 E_{ec} 为 e 和 ec 的量化值； \bar{E}_e 、 \bar{E}_{ec} 和 U 分别为相应变量的模糊子集； u 为解模糊后的精确控制值；系统两路输出分别进行控制，采用相同的控制规则表和参数。

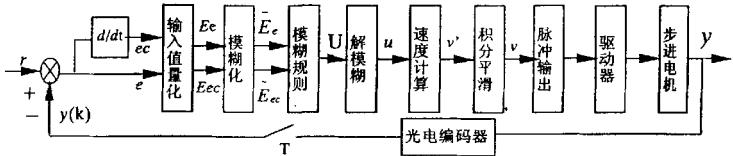


图 4-8 速度模糊控制器结构

经模糊算法后，实际输出速度为： $v'(k)=v'(k-1)+u(k)$ 。为防止控制量突变导致电机失步，输出 v' 需要积分平滑才得到 v ，输出到电机驱动器，平滑公式为

$$v(k) = \frac{1}{T} \sum_{i=-n}^k v'(i) \quad (4-9)$$

其中， $k=t/T$ ， T 为控制周期， $n=t/T$ ， t 为积分区间。

2 模糊控制规则的选择

本系统有三个模糊变量：误差 e 和误差变化率 ec 、输出 u 。一般来说，语言变量值越多，对事物的描述越精确，控制精度越高，但过细的划分使控制规则复杂，计算量增加，实现难度加大。在本控制器中， \bar{E}_e 的模糊子集取八档语言值：{负大、负中、负小、正零、负零、正小、正中、正大}，即{NB、NM、NS、N0、P0、PS、PM、PB}， \bar{E}_{ec} 和 U 的模糊子集取八档语言值：{NB、NM、NS、0、PS、PM、PB}， \bar{E}_e 和 U 论域为 $[-6,+6]$ ， \bar{E}_{ec} 论域为 $[-3,+3]$ 。

隶属函数将量化值 E_e 和 E_{ec} 模糊化为模糊判决的输入量 \bar{E}_e 、 \bar{E}_{ec} ，其形状越陡分辨率越高，控制灵敏度越高。隶属函数的变化较缓，则控制特性平缓，系统稳定性好。因此在需选择隶属函数时，一般在误差接近零的附近采用分辨率较高的隶属函数，而在误差较大的区域，常采用分辨率较低的隶属函数以提高系统稳定性。三角形的隶属函数形状简单容易计算，同其它复杂的隶属函数得出的结果差别甚小，故 e 、 ec 和 u 的隶属函数均选择为三角函数，如图 4-9 所示。

模糊规则应满足：当速度误差较大时，模糊规则应使控制器的输出能尽快减小误差；当误差较小时，模糊规则应尽力维持系统的稳定性，并避免超调。当误差为负大且误差变化为正大或正中时，控制量不宜再增加，应取控制量的变化为 0，以免出现超调。控制规则一共有 56 条，同时，应使系统升速曲线接近图 4-3 所示，故选择模糊控制规则表如表 4-1 所示。

近图 4-3 所示，故选择模糊控制规则表如表 4-1 所示。

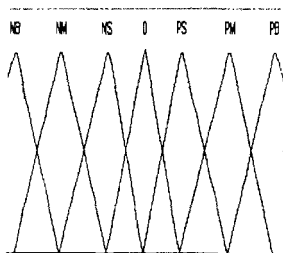


图 4-9 模糊控制隶属函数

表 4-1 模糊控制规则表

U		Ecc						
		PB	PM	PS	P0	NS	NM	NB
Ee	PB	NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS
	PM	NB	NB	NM	NM	NS	0	0
	PS	NM	NM	NS	NS	0	0	0
	P0	NS	NS	NS	0	0	0	PS
	N0	NS	0	0	0	PS	PS	PS
	NS	0	0	0	PS	PS	PM	PM
	NM	0	PS	PM	PM	PM	PB	PB
	NB	PS	PM	PM	PB	PB	PB	PB

由模糊量到精确量的解模糊通过比例因子 Ku 完成，模糊量与 Ku 相乘得到相应取值范围的精确值。模糊控制器中，量化因子 Ke 、 Kec 和比例因子 Ku 由经验公式(4-10)可得：

$$\begin{aligned}
 Ke &= \frac{PB - NB}{\beta_1 - \alpha_1} = \frac{6 - (-6)}{\beta_1 - \alpha_1} \\
 Kec &= \frac{PB - NB}{\beta_2 - \alpha_2} = \frac{3 - (-3)}{\beta_2 - \alpha_2} \\
 Ku &= \frac{\beta_3 - \alpha_3}{PB - NB} = \frac{\beta_3 - \alpha_3}{6 - (-6)}
 \end{aligned}
 \tag{4-10}$$

其中， α_1 、 β_1 、 α_2 、 β_2 、 α_3 、 β_3 分别为 e 、 ec 、 u 的取值范围。

4.3.3 模糊控制器的软件实现

在 DSP 中应用模糊控制算法时， e 和 ec 模糊化得到相应的模糊值，然后查模糊控制查询表，得到模糊输出量 \tilde{U} ，经解模糊后输出精确值 u 。模糊控制查询表利用表 4-1 的模糊控制规则表和 e 、 ec 和 u 的隶属度函数表，经过模糊关系计算和模糊判决得到一个 \tilde{U} 的论域范围内的数值表。

每条规则的模糊关系 \tilde{R}_j 如式(4-11)，总的模糊关系如式(4-12)所示。

$$\tilde{R}_j = \tilde{E}_e \times \tilde{E}_{ec} \times \tilde{U}_j \quad i=1,2,\dots,8, j=1,2,\dots,7 \tag{4-11}$$

$$\tilde{R} = \bigcup_{j=1}^7 \tilde{R}_j \tag{4-12}$$

其中， \tilde{E}_e 和 \tilde{E}_{ec} 分别为 e 和 ec 的每一个量化值在各自的隶属度表中对应的模糊子集， \tilde{U}_j 为 \tilde{E}_e 和 \tilde{E}_{ec} 在模糊控制规则表中对应的模糊子集。模糊判决由式(4-13)实现，判决结果经查询隶属函数后得到模糊控制查询表中对应位置的值。

$$\tilde{U}_j = D_j^T \circ \tilde{R} \tag{4-13}$$

其中, D_y^T 为 D_y 的行向量依次排列而成的单列矩阵。

$$D_y^T = \tilde{E}_{ef} \times \tilde{E}_{ec} \tag{4-14}$$

模糊推理采用极小值极大值法, 即: 求“并”时, 对应元素相加, 隶属度取大; 求“交”, 隶属度取小。模糊控制查询表计算结果如表 4-2 所示。

模糊控制查询表由上到下按行序依次存入 DSP 连续的内存单元中。执行算法时, 根据 E_e 和 E_{ec} 的模糊值, 由公式 (4-15) 计算控制量在模糊控制查询表中的偏移地址, 偏移地址加上查询表首地址即为所在控制量的地址。

$$\text{Table} = 13(3 - \tilde{E}_e) + (6 - \tilde{E}_{ec}) \tag{4-15}$$

4-2 模糊控制查询表

0		\tilde{E}_e													
		6	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	
\tilde{E}_{ec}	3	-6	-6	-6	-4	-4	-2	-2	0	0	0	0	3	3	
	2	-6	-6	-6	-4	-4	-2	0	0	0	3	3	4	4	
	1	-6	-4	-4	-2	-2	-2	0	0	0	4	4	4	4	
	0	-6	-4	-4	-2	-2	0	0	3	3	4	4	6	6	
	-1	-4	-4	-4	0	0	0	3	3	3	4	4	6	6	
	-2	-4	-2	-2	0	0	0	3	4	4	6	6	6	6	
	-3	-2	0	0	0	0	3	3	4	4	6	6	6	6	

在程序中, 量化和模糊化的过程为: 实际输入量除以量化因子, 经取整得到量化值, 再利用极大极小值法得到模糊值; 输出值乘上比例因子, 限幅后即得到输出精确值。模糊控制算法流程图见图 4-10。

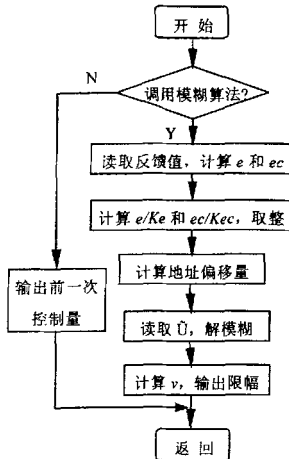


图 4-10 模糊控制算法流程图

4.3.2 仿真试验

在仿真试验中，给定速度为 120 转/分，稳态误差选为 5%，则选取 $[\alpha_1, \beta_1]$ 为 $[-10, 40]$ ， $[\alpha_2, \beta_2]$ 为 $[-10, 10]$ ， $[\alpha_3, \beta_3]$ 为 $[-30, 30]$ ，可由式(4-10)得： $K_e=0.24$ 、 $K_{ec}=0.3$ 、 $K_u=5$ 。为定性分析模糊控制对步进电机的控制效果，图 4-11 给出了在同一给定值时，PID 控制(虚线)与模糊控制(实线)的仿真比较图。由图可见模糊控制上升时间略有增加，实时性稍差，但超调量远小于 PID 控制，稳定效果更好。图 4-12 为对应的速度偏差的变化曲线。

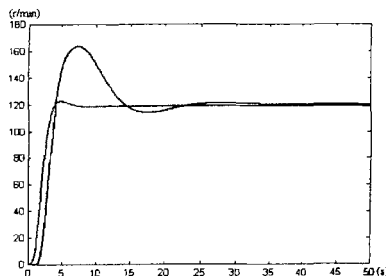


图 4-11 模糊控制与 PID 控制效果仿真图

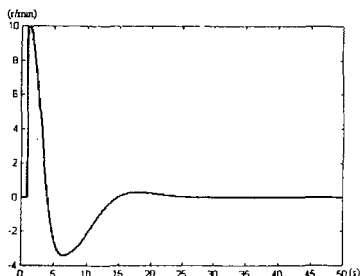


图 4-12 速度偏差的变化曲线

4.4 自整定模糊 PID 控制器

模糊控制有较强的自适应能力，对非线性、大延迟等复杂系统有良好的控制效果，但存在稳态误差，不利于精确控制。PID 控制原理简单，易于实现，鲁棒性较强，是应用最广泛的控制方法，其局限性是超调量大，无法实现非线性系统的精确控制。这两种方式结合后不但能实现精确控制，而且具有较强的适应性，可以更有效地实现人的控制策略和经验^[45]。本文讨论了参数自整定模糊 PID 的一种方法，并对其自适应能力进行了仿真与分析。

4.4.1 模糊 PID 控制器的结构

模糊 PID 控制系统框图如图 4-13 所示^[46]，模糊控制结构如节 4.2.2 所述， ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D 为修正参数。

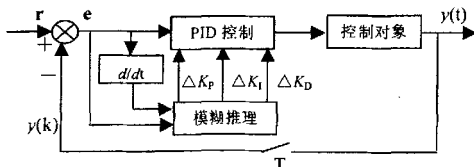


图 4-13 自整定模糊 PID 系统结构图

PID 控制器的参数 K_p 、 K_i 、 K_D 由式(4-16)计算可得(K_p' 、 K_i' 、 K_D' 为 PID 的初值):

$$\begin{aligned} K_p &= K_p' + \Delta K_p \\ K_i &= K_i' + \Delta K_i \\ K_D &= K_D' + \Delta K_D \end{aligned} \quad (4-16)$$

此时参数自整定模糊 PID 控制器的传递函数表示为

$$\begin{aligned} u(k) &= u(k-1) + (K_p + \Delta K_p)[e(k) - e(k-1)] \\ &\quad + (K_i + \Delta K_i)Te(k) + \frac{(K_D + \Delta K_D)}{T}[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \end{aligned} \quad (4-17)$$

从 PID 控制特点我们知道:积分作用强,系统超调大,响应快;微分作用强,系统稳定性好,超调小,抑制干扰能力下降。针对不同阶段的 $|e|$ 和 $|e_c|$,参数整定原则如下:

(1)被控量接近给定值时,与 $e_c(k)$ 同号的积分作用能避免积分超调和振荡,有利于控制;当被控量远离给定值时,与 $e(k)$ 相反的比例作用将会减小超调,避免振荡。(2)调节前期, K_p 适当加大, K_i 取较小值或零,可避免超调,提高响应速度;中期 K_p 、 K_i 适中,兼顾稳定性与控制精度;后期 K_p 减小, K_i 适当增大,以消除误差,抑制超调。(3)微分系数 K_D 可抑制被控量变化,缩短调节时间,减小稳态误差,是对 K_p 、 K_i 的补充。为加快过渡过程,可适当加大 K_D 取值。

模糊控制器输入输出变量的模糊子集分别为 \tilde{E}_e 、 \tilde{E}_{ec} 、 $\Delta\tilde{K}_p$ 、 $\Delta\tilde{K}_i$ 、 $\Delta\tilde{K}_D$,各变量语言值和隶属度函数均如节 4.2.1 所述。由上述整定原则,得到 $\Delta\tilde{K}_p$ 、 $\Delta\tilde{K}_i$ 、 $\Delta\tilde{K}_D$ 的控制规则表如表 4-3 所示:

表 4-3 模糊控制规则表

$\Delta\tilde{K}_p$ $\Delta\tilde{K}_i$		\tilde{E}_{ec}						
		NB	NM	NS	O	PS	PM	PB
\tilde{E}_e	NB	PB/0/PB	PB/PB/PM	PB/PB/PS	PB/PS/PS	PM/PM/0	PM/PS/PM	PS/0/PB
	NM	PB/0/PS	PB/PM/PM	PB/PM/PS	PM/PM/PS	PM/PS/0	PS/PS/PS	0/0/PS
	NS	PM/0/NS	PM/PS/NM	PM/PM/NS	PS/PS/0	0/0/0	0/0/PS	0/0/PS
	N0	PM/0/NM	PS/0/NM	PS/PS/NS	0/0/0	0/NS/NM	0/0/PS	NS/0/PM
	P0	PS/0/NM	PS/0/NM	0/PS/NS	0/0/0	NS/NS/NM	NS/0/PS	NS/0/PM
	PS	PS/0/NM	0/0/NM	0/0/0	0/NM/0	NS/NM/PS	NM/0/PM	NM/0/PM
	PM	0/0/NS	0/NS/NS	NS/NS/PS	NS/NM/PS	NM/NM/PS	NB/NM/PM	NB/0/PS
PB	0/0/NS	0/NS/0	NS/NM/PS	NM/NB/PS	NB/NB/PM	NB/NB/PB	NB/0/PB	

本文选用系统对象模型为式(4-4),利用节 4.2.1 所述稳定边界法得到参数值: $T_k=21.5s$; $K_{PK}=12.5$,由式(4-8)计算得: $K_p'=7.5$; $K_i'=0.7$; $K_D'=25$ 。采用幅值为 100 的阶跃信号,控制器中各变量的基本论域为: $e: [-10, 30]$ 、 $e_c: [-6, 4]$ 、 $\Delta K_p: [-4, 4]$; $\Delta K_i: [-0.4, 0.4]$; $\Delta K_D: [-12, 12]$ 。根据式(4-6)计算,输入量

的量化因子: $K_e=0.3$; $K_{ec}=0.6$; 输出量的比例因子: $K_1(\Delta K_p)=0.67$, $K_2(\Delta K_I)=0.067$, $K_3(\Delta K_D)=2$ 。

4.4.2 仿真试验

由对象(4-4)进行仿真, 仿真原理图如图 4-15 所示, 在仿真试验中, 为减少系统响应时间, K_P 和 K_D 的值均取较大值。由仿真曲线可知, 模糊 PID 与 PID 控制上升时间基本一致, 但前者基本无超调, 且稳定性好, 完全能满足系统控制要求。考虑到在实际过程中控制对象往往具有时变性, 特性会随之变化, 此时重新整定参数是困难的, 因此要求控制器有自适应能力。为考察在对象特性变化时模糊 PID 的自适应能力, 本文分别选用不同仿真对象进行比较。

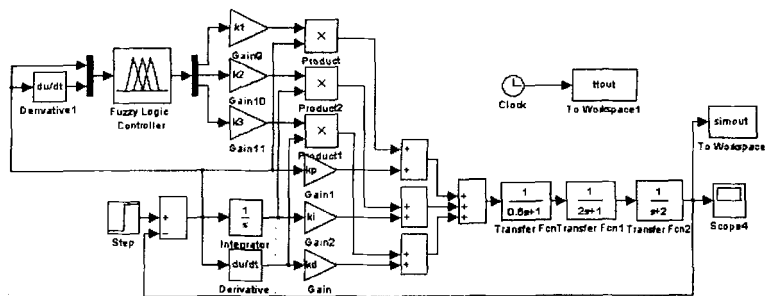


图 4-15 参数自整定模糊 PID 仿真原理图

步进电机单相通电时, 传递函数为二阶, 仿真对象分别选用:

$$G(s) = \frac{1}{0.8s^2 + 0.15s + 1}, \quad G_1(s) = \frac{1}{0.6s^2 + 0.25s + 1}$$

参数值保持不变, 阶跃响应曲线见图 4-16 中 G1、G2, 可见系统对于模型变化时控制效果良好, 与 PID 控制相比上升时间没有明显增加, 而且没有超调。

当步进电机两相绕组通电时, 两相电流分别产生电磁转矩, 同时还产生互感转矩, 步进电机的传递函数不再是二阶系统, 可近似的取作三阶系统^[44]。此时, 对象分别选用: $G_2(s) = \frac{1}{(s+2)(2s+1)(0.6s+1)}$, $G_3(s) = \frac{1}{(s+3)(s+1)(0.6s+3)}$,

$$G_4(s) = \frac{1}{(s+2)(s+1)s}$$

做定性仿真, 参数值保持不变, 仿真曲线见图 4-17 中 G、G3 和 G4。仿真结果表明, 在参数值不变的情况下, 模糊 PID 对于对象模型有较强的自适应能力, 控制效果良好, 具有较好的控制精度, 其升速曲线也基本满足图 4-3 所示。

参数自整定模糊 PID 控制器的缺点在于设计控制器时需要确定三个模糊控制规则表, 有一定难度。因此在实际应用中, 需要对该控制算法进行优化, 使

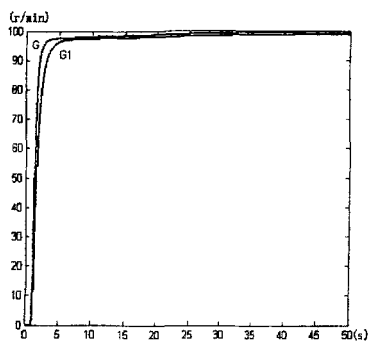


图 4-16 二阶对象仿真结果

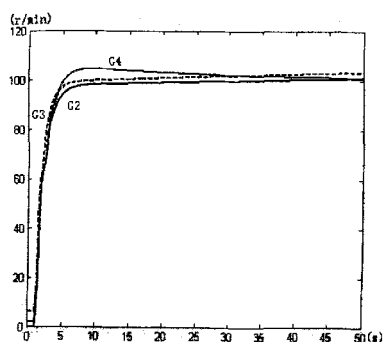


图 4-17 三阶对象仿真结果

第五章 结论与展望

前面各章完成了移动机器人运动控制器的系统硬件和控制软件的设计,本章对前段时间的设计与研究做一个总结,并对以后的研究开发作简要的展望。

5.1 结论

本系统以 TMS320LF2407DSP 为核心,利用其高度集成的外设与高速的运算速度,使运动控制器具有简单、可靠的优点。本文从移动机器人运动控制器的设计要求出发,介绍了运动控制器的整体设计及主要的电路结构,详述了其软件设计要点,最后介绍了速度模糊控制器的设计及仿真。

在系统的设计与研究过程中,本文取得成果有:

(1)多种方案的比较、选择。本文分析了运动控制系统常用六种方案的优缺点,根据移动机器人的控制要求、可靠性和成本因素,采用了基于高速高性能的 DSP 控制器的解决方案,简化了硬件结构,提高了可靠性,并有利于以后的功能扩展。

(2)以 LF2407 作为核心,设计了移动机器人运动控制系统的整体结构及主要硬件电路。设计内容主要包括:运动控制系统的行驶机构、DSP 选型与功能分析、驱动电机的选型、运动控制系统的详细结构及各模块功能、主要硬件电路(ADC、SCI、信号隔离、复位电路等)设计方案、步进电机的驱动控制等。面向电机控制的专用 DSP 芯片 TMS320LF2407 拥有强大的运算能力,丰富的集成外设,能满足移动机器人复杂算法和实时性的要求,并大大减少了外围电路,降低了系统成本,满足了高精度与低精度的不同要求。

(3)根据 DSP 的性能和控制特点,利用汇编语言编写了运动控制系统的程序。本系统根据功能将控制软件划分为几个模块,详细设计了控制脉冲输出、串行通信、模数转换、QEP 计数与 FLASH 引导程序等内容,并给出了主要的程序流程图。在串行通信中,本文创新点是采用了由上位机控制的通信方法和简单地数据冗余校验方式,不但减少了系统的通信负担,而且提高了控制实时性。

(4)本文对步进电机的升降速性能进行了分析,提出了比较理想的升降速曲线;对步进电机的数学模型进行了仿真分析,说明仿真的有效性,并根据步进电机的模型设计了速度控制算法结构,介绍了参数选择方法,进行了仿真分析。

(5)本文介绍了 PID 控制与模糊控制算法在 DSP 控制器中的实现。在 PID 控制中,采用了稳态边界法进行参数整定;在模糊控制中,介绍了模糊控制器的结构设计与控制查询表的计算方法,并给出了程序流程。结合 PID 控制与模糊控制的长处,最后本文介绍了参数自整定的模糊 PID 控制器的设计,并对其控制效果进行了仿真分析。

5.2 展望

经过前面章节的详细叙述, 论文从应用的角度, 讨论了移动机器人运动控制系统的硬件与软件设计。随着移动机器人控制理论的发展, 工作环境的复杂度的提高, 研究人员对运动控制系统的要求越来越高, 其研究内容和系统结构也日益广泛和复杂, 新技术和新方法不断出现。考虑本课题研究初期的实验要求, 本文中有很多内容没有涉及到, 这些只能留待日后进一步改善。

运动控制器的硬件设计有很多的考虑要素, 如抗干扰问题, A/D 转换精度, 外围电路的速度与 DSP 的实时性能匹配问题。这些问题相互影响, 要确定一个最优的电路结构面临众多的限制, 也需要参考大量的实际经验, 因此在电路结构方面仍有待改进, 使之更适应高速、复杂的控制策略。在运动控制功能扩展上, 以后可增加避碰装置, 以提高机器人运动的安全性; 另外可在中轮和后轮上也加装光电编码器, 对更多的反馈信号进行检测与处理, 增加上位机的监控信息, 利于更优化的闭环控制。

在以后的工作中, 对运动控制器控制软件的改进主要集中于以下方面:

(1) 将程序按功能划分模块, 各模块之间相对独立, 有统一的接口定义, 这样有利于功能扩展和更换控制算法。

(2) 对各驱动电机进行独立控制。因为 LF2407 仅有 4 个通用定时器, 不但要中断输出控制脉冲, 而且要对光电编码器进行计数, 限制了电机控制的独立性。在以后的工作中, 可以考虑对光电编码器的计数由外部双向计数器 74LS193 完成。如果对输出时间间隔要求不严格时, 控制脉冲的输出在程序中由延时程序实现, 也可以解决这个问题。

(3) 改进 DSP 与上位机的(通过工控机进行)通信校验方法, 使其不但能校验出错误, 而且能纠正错误, 提高系统通信的可靠性, 减少通信频率。

(4) 提高速度算法的智能性和自适应能力, 具有一定程度的自主决策能力, 能够在不同的复杂环境下正常运行。

(5) 增加运动控制器的网络通信功能, 如利用 DSP 自带的 CAN 总线控制器实现, 便于资源共享和多机器人协同。

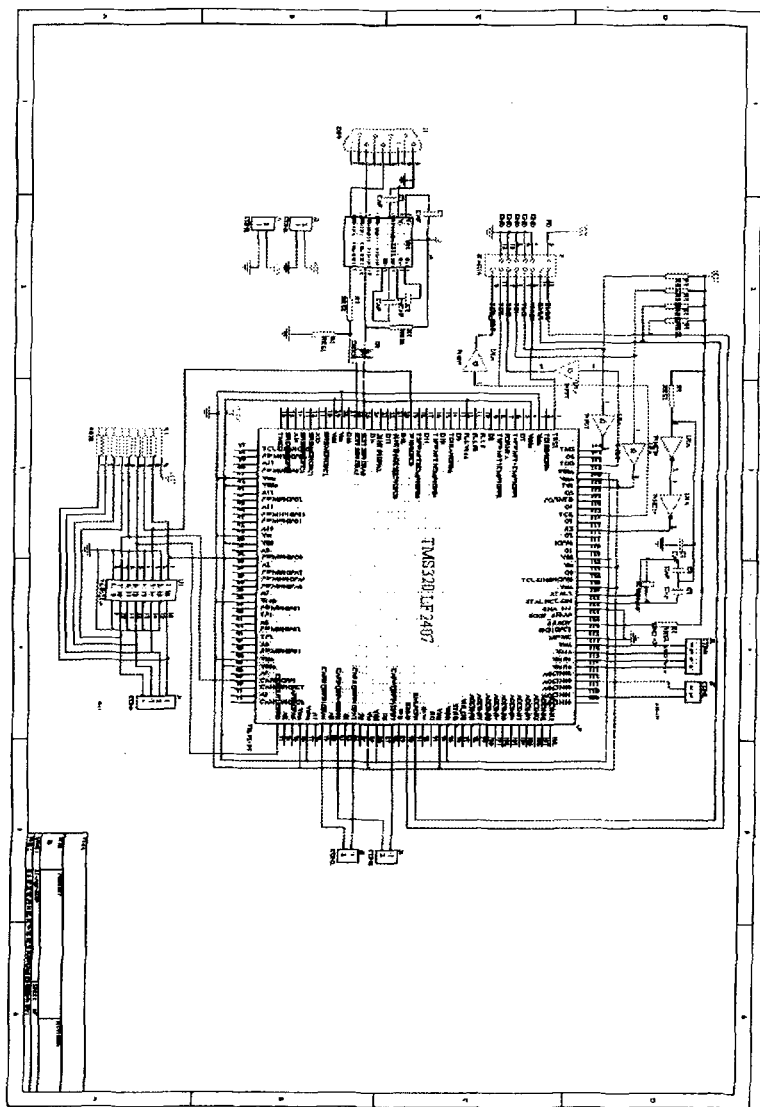
参考文献

- [1] 蔡自兴, 贺汉根, 陈虹. 未知环境下移动机器人导航控制的若干问题. 控制与决策, 2002, 17(4): 385~390, 464
- [2] 蔡自兴. 机器人学. 北京: 清华大学出版社, 2000. 18~19, 46~53
- [3] 王文学, 孙萍, 徐心和. 足球机器人系统结构与关键技术研究. 控制与决策, 2001, 16(2): 233~235
- [4] Gordon Tim, Howell Mark, Brandao Felipe. Integrated Control Methodologies for Road Vehicles. Vehicle System Dynamics, 2003, 40(9): 157~190
- [5] 李贻斌. 现代科技革命与机器人的发展. 山东交通学院学报, 2002, 10(4): 53~57, 74
- [6] 王田苗, 刘进长. 机器人技术主题发展战略的若干思考. 中国制造业信息化, 2003, 32(1): 31~36
- [7] 韩安太, 刘峙飞, 黄海. DSP 控制器原理及其在运动控制系统的应用. 北京: 清华大学出版社, 2003. 5~8, 27~31
- [8] 孙迪生, 王炎. 机器人控制技术. 北京: 机械工业出版社, 1997. 45~56
- [9] 范永, 谭民. 机器人控制器的现状与展望. 机器人, 1999, 21(1): 75~80
- [10] 柳洪义, 宋伟刚. 机器人技术基础. 北京: 冶金工业出版社, 2002. 16-29, 49-50, 165~174
- [11] 祖莉, 王华坤. 智能移动机器人运动控制系统及算法的设计. 机器人技术与应用, 2002, 24(5): 39~42
- [12] Huang Xin-han, Jean Bosco Mbede, Wang Min. Fuzzy Sensor-based Motion Control among Dynamic Obstacles for Robot Manipulators. Fuzzy Systems and Mathematics, 2000, 14(1): 100~110
- [13] 周学才, 李卫平, 李强. 开放式机器人通用控制系统. 机器人, 1998, 20(1): 25~31
- [14] Philip J. Fiedler, Chris J. Schilb. Open-architecture systems for robotic work cells, Robotics today, 1998, 11(4): 1~6
- [15] 欧青立, 何克忠. 室外智能移动机器人的发展及其关键技术研究. 机器人, 2000, 22(6): 519~525
- [16] 程配青. 数字信号处理. 北京: 清华大学出版社, 1995. 3~8
- [17] 张雄伟, 曹铁勇. DSP 芯片的原理与开发应用(第2版). 北京: 电子工业出版社, 2001. 2~3
- [18] 李峻. 步进电机的运动控制系统及其应用. 微特电机, 2000, 28(2): 37~39
- [19] E. C. T. So, S. J. Yang. The Effect of Tooth Shape on Radial Forces in Step Motors. IEEE Trans. on Magnetics, 1993, 29(6): 2413~2415

- [20] J. E. Vadell, L. E Chiang. Stepping Motor Driving by controlled-Energy Discharge. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2000, 46(1): 52~60
- [21] P. Cmosija, B. Kuzmanovic, S. Ajdukovic. Microcomputer Implementation of Optimal Algorithms for Closed-Loop Control of Hybrid Stepper Motor Drives. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2000, 47(6): 1319~1325
- [22] 李元密,林胜福. 步进电机超前角信息的检测. 厦门大学学报(自然科学版), 1995, 34(3): 368~372
- [23] N. Matsui, M. Nakamura, T. Kosaka. Instantaneous Torque Analysis of Hybrid stepping Motor. IEEE Trans. on Industry Applications, 1996, 32(5): 1176~1182
- [24] 靳方义, 郝晓弘. 无刷直流电动机方波电机控制特性及其伺服控制策略. 微特电机, 1999, 27(5): 19~22
- [25] N. Matsui, M. Nakamura, T. Kosaka. Instantaneous Torque Analysis of Hybrid Stepping Motor. IEEE Trans. on Industry Applications, 1996, 32(5): 1176~1182
- [26] 贺建德, 廖迪洪, 张彭. 履带式移动机器人行动规划技术的研究. 机器人, 1994, 16(6): 329~335
- [27] 王巍, 夏玉华, 梁斌. 月球漫游车关键技术初探. 机器人, 2001, 23(3): 280~284
- [28] 8XC196KC/8X196KC20 Commercial/Express Chmos MicroController. INTEL Corporation, 1994
- [29] TMS320LF2407 TMS320LF2406 TMS320LF2402 DSP Controllers, Revised. Texas Instruments, 2001. 3~4, 42~43, 108
- [30] 李发海, 朱东起. 电机学. 北京: 科学出版社, 2001
- [31] 田淑杭, 蔡自兴, 邹小兵. 基于 DSP 的移动机器人驱动控制系统的设计. 中国人工智能进展(2003). 中国人工智能学会第 10 届全国学术年会论文集, 下卷, 北京: 北京邮电大学出版社, 2003. 1369-1373
- [32] 胡红. 巧用 MAX706. 山东电子, 2000, (1): 10~12
- [33] 刘和平 等. TMS320LF24x DSP 结构、原理及应用. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003. 1~4, 96~101, 126~142, 164~165, 176~184, 214~220
- [34] TMS320LF/LC240x DSP Controllers Reference Guide. Texas Instruments, 2000. 5-5~5-15, 6-31~6-35, 6-80, 6-85~6-97, 7-20~7-27, 8-22~8-31
- [35] 刘艳玲. 采用 MAX232 实现 MCS-51 单片机与 PC 机的通信. 天津理工学院学报, 1999, 15(2): 57~61
- [36] 赵峰. EPC-755A 微型光电编码器及其应用. 国外电子元件, 2000, 11(1): 11~12
- [37] Code Composer Studio User's Guide. Texas Instruments, 2000.
- [38] 茅飞. TMS320F240 片内 FLASH 串行口编程. 电子产品世界, 2002, 1B: 39~40
- [39] 公茂忠, 刘汉奎, 徐殿国. FLASH 存储器的在系统编程及其在 DSP 系统中的应用. 电子

- 技术应用, 2002, 28(3): 69~71, 74
- [40] TMS320F/C24x DSP Controllers Reference Guide. Texas Instruments, 1999. 2-64~2-67
- [41] 陈爱国, 黄文玲, 杨红红. 步进电机升降速曲线的研究. 机电产品开发与创新, 2003, (2): 47~49
- [42] 王季铁, 曲家骥. 执行电动机. 北京: 机械工业出版社, 1997. 152~156
- [43] 欧阳黎明. MATLAB 控制系统设计. 北京: 国防工业出版社, 2001
- [44] S. G Kong, B. Kosko. Adaptive Fuzzy Systems for Backing up a Truck and Trailer. IEEE Trans. on Neural Networks, 1992, 3(2): 211~223
- [45] Buckley J J. Universal Fuzzy Controllers. Automatica, 1992, 28(6): 1245~1248
- [46] 田淑杭, 姜丽娟. 一种参数自整定模糊 PID 控制器的研究. 电气传动自动化, 2003, 25(6): 28~31
- [47] 丛爽. 神经网络、模糊系统及其在运动控制中的应用. 合肥: 中国科技大学出版社, 2001. 110~134, 158~171
- [48] TMS320F/C24x DSP Controllers CPU and Instruction Set Reference Guide. Texas Instruments, 1999
- [49] Ying H. The simplest fuzzy controls using different inference methods are different nonlinear proportional-integral controllers with variable gains. Automatica, 1993, 29(2): 499~505.
- [50] 任晓虹, 周启炎, 孟丽荣. 步进电机闭环控制的研究. 沈阳工业学院学报, 2003, 22(6): 6~8
- [51] 刘荣先, 杨军. 模糊理论在步进电机控制中的应用. 信息技术, 2000, (2): 11~12
- [52] 刘亚东, 李从心, 王小新. 步进电机速度的精确控制. 上海交通大学学报, 2001, 35(10): 1517~1520
- [53] 李峻, 李学全, 胡德金. 步进电机的运动控制系统及其应用. 微特电机, 2000, (2): 37~39
- [54] 李啸, 张洪钺, 李骥. 基于模糊 PID 的轮式移动机器人轨迹控制. 机器人技术与应用, 2002, (5): 30~33
- [55] 贾智伟, 李应红. 串行通信中应注意的两个问题. 计算机应用, 2001, 27(8): 12~14

附录 控制板原理图



致 谢

在本文结束之际，我首先要感谢我的导师蔡自兴教授。我的学习、研究和论文的写作是在蔡教授的直接关怀和悉心指导下完成的。导师渊博的学术知识、深厚的学术造诣和敏锐的洞察力，使我始终在一种浓厚的学术氛围中学习、研究，自身得到很大的提高，特别是蔡老师严谨的治学态度和严于律己的风格使我受益匪浅，永远是学生学习的目标。三年来，蔡老师一直在学习、生活等各方面给予我无微不至的关怀和细致指导，在此谨向导师蔡自兴教授致以诚挚的谢意。

在本文的研究工作中，邹小兵博士为我提供了具体的指点和多方面的帮助。邹小兵博士有丰富的实践经验和踏实谨慎的研究作风，这些给我很大的帮助和长久的影响，培养了我的研究作风，在此向邹小兵师兄致以深深的感谢。

感谢信息科学与工程学院智能系统与智能软件研究所的魏世勇老师、肖晓明老师在工作和生活中给予我的关心和帮助，我的学习、研究的顺利进行离不开他们的辛苦工作和热心帮助。

李枚毅老师的学术观点开阔了我的视野和思路，使我受益匪浅；王璐博士在我的学习中给我的很多指点，还有各位师弟师妹也给了我热心的帮助，在此一并感谢。

在共同的学习、研究中，我的各位同学：朱光辉、陈白帆、赵慧、庞慧，营造了良好的研究氛围和和谐的工作环境，我从他们身上得到了很多的支持和帮助，也学到了很多的东西，使我愉快的度过了近三年的学习时光。

同时，感谢智能所其它所有的同学和老师，他们同样对我帮助很大，大家一起营造了良好的学习氛围和研究环境，给我留下了美好的印象。

最后，特别感谢国家自然科学基金委的支持，是自然科学基金重点项目“未知环境下移动机器人导航控制的理论与方法研究”为本学位论文研究提供了一个良好的环境。

田淑杭

2004年4月