

摘 要

机器人在工业生产中有着广泛应用。目前，工业机器人控制系统大多采用封闭结构的专用控制器，其通用性差、生产成本低、不易扩展和维护，已越来越不能适应现代制造业柔性化、网络化生产的需求。开发利用现有资源的开放式机器人控制器，以降低机器人成本，使机器人像个人计算机一样普及将成为机器人的一个重要方向。本文基于工控机、单片机和 Windows 2000 操作系统，以 SCARA（平面关节型）机器人为研究对象，设计研制了高性能、低成本、开放式的控制器，并设计制作了 SCARA 机器人样机。

采用二级计算机体系结构，设计了 SCARA 机器人控制器。其中，以工控机作为上位机，实现人机界面、轨迹规划、运动控制和状态监控等功能；下位机采用 STC89C51 单片机控制系统，通过 PCL-731 数字 I/O 卡与上位机通讯，实现接收上位机指令、驱动机器人关节运动等功能。

建立了 SCARA 机器人的机械结构模型。SCARA 机器人由六部分组成，包括一个移动关节和三个旋转关节，各关节采用伺服电机驱动。基于模块化设计思想，采用 Pro/ENGINEER 和 AutoCAD 完成了机器人本体的三维模型设计和二维图设计，根据设计图加工、制作了主要机械部件，完成了机器人本体的装配和调试。

设计制作了 STC89C51 单片机控制系统硬件电路，完成了伺服驱动器的主电路配线和机器人控制器的硬件电路配线。采用 C++ Builder 和汇编语言开发了控制器的上位机控制系统和下位机控制系统，设计了上位机与下位机的通讯协议和通讯模块，并对控制器的硬件系统和软件系统进行了综合调试。

完成了 SCARA 机器人的工作稳定性实验、点位运动实验和连续运动实验。实验结果表明，基于工控机和 Windows 2000 操作系统设计的开放式 SCARA 机器人控制器具有通用性强、开放性好、操作简单、易于扩展、维护方便等特点。基于该控制器，利用现有资源设计的 SCARA 机器人生产成本低，功能扩展性强，具有良好的实用价值和广阔的市场前景。

关键词：SCARA 机器人；开放式；控制器；工控机；单片机；I/O 卡；伺服电机

Abstract

Robot has been widely used in industry production. At present, most of the industry robot control systems use close and special controllers, which are low universal, high cost, not easy to be extended and maintained, and can't adapt to the requirement of flexible and network production of modern manufacturing. It will be an important way of robot to develop open architecture robot controller by using existing resource to reduce the cost of robot and make robot popularize just like computer. The paper studies SCARA robot, designs and produces a kind of SCARA robot controller that is of high performance, low cost and open-architecture based on industry PC, single chip and Windows 2000. A SCARA robot prototype machine is designed and produced.

The robot controller is designed with the structure of two levels computer system. On the one hand, Industry PC is used as master to offer human-computer interface, mark out the track, control the movement, inspect and control the status. On the other hand, STC89C51 single chip control system is used as slave to communicate with the master by PCL-731 digital I/O card, receive the instructions from master computer and drive the robot joint moving.

The model of mechanical structure of SCARA robot is built. SCARA robot is consisted of six parts, includes a moving joint and three rotary joints. All the joints are drove by servo motors. The author designed 3-dimension models and 2-dimension draws of SCARA robot's manipulator by Pro/ENGINEER and AutoCAD based on model designing thinking. The main mechanical parts of robot arms are machined and processed according to the draws, and the assembling and debugging of SCARA robot's manipulator has been finished.

The author designed and produced hardware circuit of STC89C51 single chip control system. The wiring of servo motor drivers' main circuit and hardware circuit of the robot controller is finished. The author developed main computer control system and slave computer control system of SCARA robot controller by C++ Builder and compiling language. The communication protocol and models between main and slave computer are also designed. Meanwhile, hardware system and software system of the controller are

synthetically debugged.

The experiment of SCARA robots' working stability, moving from point to point and moving continuous is finished. The results of the experiment indicate that the robot controller with open architecture based on industry PC and Windows 2000 poses the advantages of good versatility, good openness, operating simply, expanding easily and maintaining expediently. The SCARA robot designed based on this controller by existing resource has low cost, powerful expansibility of function, good utility value and wide market prospect.

Key Words: SCARA Robot, Open Architecture, Controller, Industry Computer, Single Chip, I/O Card, Servo motor

第一章 绪 论

1.1 工业机器人的发展及研究现状

机器人自诞生之日起,便显示出其强大的生命力。机器人首先在工业生产中得到了广泛应用,并给传统工业带来了质的飞跃。它不仅提高了传统产业的自动化程度,提高了劳动生产率,而且还推动了以资源消耗低、环境污染少为特征的新型工业的诞生。随着人类在机械工程、电气工程、微电子技术、计算机技术、控制论、传感技术、信息学、声学、仿生学及人工智能等学科领域的飞速发展,机器人技术的应用也正在向农业、林业、畜牧养殖、海洋开发、宇宙探索、国防建设、安全救济、生物医学、服务娱乐等新领域拓展开来,并已取得显著进展。机器人技术已成为高科技应用领域中的重要组成部分^{[1]-[15]}。

机器人主要有两大类:用于制造环境下的工业机器人和用于非制造环境下的服务机器人。工业机器人是一种对生产环境和生产条件具有较强的适应性和灵活性的柔性自动化装备,它主要用于现代制造业中代替人们从事繁重、重复单调、环境恶劣危险、人做不了或做不好的工作,从而减轻了人们的劳动强度,改善了劳动环境,并有效地提高了生产的自动化程度,提高了产品质量和劳动生产率。工业机器人是柔性化制造系统(FMS)、自动化工厂(FA)和计算机集成制造系统(CIMS)必不可少的自动化工具,它的发展和应用情况已成为一个国家工业自动化水平的重要标志^{[9]-[15]}。

1.1.1 工业机器人的发展历程

1954 年美国的 George Devol 设计了第一台可编程机器人,取名为“万能自动(Universal Automation)”。该机器人自带存储器,可以实现点到点的再现运动。1956 年,Devol 和被誉为“工业机器人之父”的 Joseph F. Engel Berger 成立了 Unimation 公司,开始设计、生产工业机器人 UNIMATE,并于 1960 年研制出第一台机器人样机。同时,美国 AMF (American Machine and Foundry) 公司也设计制造了另一种圆柱坐标形式的机器人 Versatran。Unimation 和 Versatran 成为世界上最早的工业机器人。1962 年,美国 General Motor 公司的装配生产线安装了世界上第一台工业机器人 UNIMATE,从而拉开了工业机器人为人类服务的序幕^{[11][16]}。

20 世纪 60 年代是工业机器人的萌芽发展阶段。工业机器人首先被应用于汽车生产线的搬运、焊接、喷漆等作业,它们在工业生产中表现出良好的灵活性和稳定性,极大

地提高了生产效率，因此在工业生产中得到推广。

20 世纪 70 年代，随着计算机技术、自动控制理论的发展和工业生产对自动化需求的不断增长，工业机器人技术得到了迅速发展。1970 年在美国召开了第一届国际工业机器人学术会议，1973 年，Richard Hohn 为 Cincinnati Milacron 公司开发了第一台由微型计算机控制的工业机器人 T3，该机器人由液压驱动，能提升的有效负载达 45 公斤。1974 年，Scheinman 教授设计了一台通过触觉和压力传感器反馈进行小零件装配的机械臂 the Silver Arm，并成立了 Vicarm 公司，将这种新型机器人推向市场。1977 年，欧洲的 ASEA 机器人公司推出了两款使用微型电子控制器进行编程操作的工业机器人。同年，Unimation 公司收购了 Vicarm 公司，并于 1978 年采用 Vicarm 的设计技术，开发了 PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly) 通用工业机器人。这是一种具有多关节、全电动、多 CPU 分级控制的机器人，采用 VAL 专用编程语言，可配置视觉、触觉和力觉传感器。它的诞生标志着工业机器人进入了一个新的发展阶段，直到现在，工业机器人的机械结构、控制结构和编程语言都是以 PUMA 机器人为基础的^{[2][16]}。

20 世纪 70 年代也是日本的机器人产业迅速发展的时期。1967 年日本 Kawasaki 重工公司从美国购买了机器人的生产许可证，1968 年开始生产机器人^[2]。进入 20 世纪 70 年代后，日本工业高速发展，劳动力严重短缺，因此工业机器人受到了日本政府和工业界的广泛重视。日本采取了一系列政策措施，鼓励工业机器人的研究和生产，其机器人拥有量很快超过了美国，一举成为“机器人王国”。

20 世纪 80 年代至 90 年代，工业机器人进入了高速发展时期，汽车、摩托车、电机、电子等行业开始大量使用工业机器人，推动了机器人产业的发展。1980 年，工业机器人的产值增长超过了 80%，被称为是“机器人时代的第一年”，之后，工业机器人一直保持着较高的年增长率，到 1990 年，世界通用工业机器人的年销售量达到了 80,000 台。但在 1991~1993 年出现下滑。之后，工业机器人市场又开始复苏，2004 年销售量达到了 95,368 台^[13]。

进入 20 世纪 90 年代，具有感知、思维、行动能力的智能机器人开始出现，成为目前工业机器人的主要研究发展方向。

1.1.2 国外的研究现状及发展趋势

在发达国家，工业机器人技术已经取得了非常广泛的应用。据统计，截止到 2004 年底，世界范围内的工业机器人实际装备总量为 847,764 台，其中日本为 356,483 台，约占全世界装备总量的 42%，美国为 114,531 台，欧洲为 278,906 台。在欧洲国家中，

德国工业机器人装备量居首位,为 120,544 台,意大利和法国分别为 53,244 台和 28,133 台。在亚洲,韩国的机器人产业发展迅速,2004 年底其工业机器人装备总量约为 51,302 台。就机器人密度(即制造业中每万名雇员占有的工业机器人数量)而言,日本、德国和韩国的机器人密度居世界前三位^{[13]-[15]}。

近年来,国外工业机器人技术的研究发展和应用主要有如下几个趋势^{[12]-[23]}:

1) 工业机器人在制造业的应用范围越来越广阔,并向食品、核能、矿业和建筑等工业新领域扩展。汽车制造业一直以来都是机器人技术最主要的应用领域,但在 2004 年,这一趋势发生了重大改变。据统计,2004 年世界范围内非汽车行业的工业机器人订单量增长了近 42%,而汽车整车制造业增长不到 1%,汽车配件行业增长了 19%。在北美和亚洲,非汽车行业的订单量分别增长了 72%和 42%。在机床、橡胶、食品、包装和塑料等行业领域,机器人的需求量将进一步增长。

2) 工业机器人的价格不断下降,而性能则不断提高,趋向于高速度、高精度、高可靠性、便于操作和维护等方面。统计数据显示,2003 年一台工业机器人的平均价格只相当于 1990 年同等性能机器人平均价格的四分之一,在美国,机器人与劳动力相比的相对价格已经从 1990 年的 100 降到了 2003 年的 28,如果考虑机器人质量的改进,则可下降到 12。不断下降的机器人相对价格和日益减少的劳动力成本成为机器人投资增长的主要驱动力之一。

3) 机器人控制系统向基于 PC 的开放式机器人控制器方向发展,开放化、模块化和标准化设计成为主要发展方向,人机界面更加友好。采用系统的观点来发展新型机器人控制系统,研究机器人协作控制,多智能体调控技术成为新兴研究领域。

4) 机器人编程语言趋于通用化。ABB 公司开发的 RAPID 通用模块化编程语言提供了强大的编程功能和友好的用户界面,该公司生产的大部分机器人产品都采用了该种编程语言。最近,美国机器人空间开发公司开发了 Robot Script 通用机器人编程语言,该语言简单易学,通用性强,可运行于该公司生产的通用机器人控制器 URC 中。

5) 机械结构趋向于模块化、可重构化,应用类型以关节型为主。2004 年世界范围内新装备的机器人中,关节型机器人占 62.5%,SCARA(平面关节型)机器人占 11.6%。而美国 2004 年新装备机器人中,关节型机器人所占比例高达 90%,欧洲为 74%。

6) 机器人朝着智能化方向发展,传感器作用日益重要。除采用传统的位置、速度、加速度等传感器外,装配、焊接、遥控机器人还应用了视觉、力觉、触觉等传感器,多传感器的融合配置技术在产品化系统中已有成熟应用。行之有效的多传感器融合算

法，特别是非线性及非平稳、非正态分布情形下的多传感器融合算法是传感器技术的研究重点。

7) 机器人机构技术方面重点研究新的机器人结构和功能，以及新的设计方法，探索新的高强度轻质材料，进一步提高机器人的动态性能。

8) 虚拟现实技术在机器人中的作用已从仿真、预演发展到用于过程控制。

9) 机器人遥控、监控技术朝着人机交互控制方向发展，遥控加局部自治系统遥控机器人的发展使智能机器人走出实验室进入实用化阶段。

10) 机器人化机械开始兴起。自 1994 年美国开发出“虚拟轴机床”以来，机器人化机械便成为新兴研究方向。机器人化机械研究主要包括并联机构机床(VMT)、机器人化加工中心(RMC)、机器人化无人值守和具有自适应能力的多机遥控操作的大型散料输送设备的研究开发等。

1.1.3 我国的研究现状及发展趋势

我国政府非常重视机器人技术的研究和发展。“七五”期间，国家投入相当资金，进行工业机器人基础技术、基础元器件、工业机器人整机及应用工程的开发研究。经过五年攻关，完成了示教再现式工业机器人成套技术的开发，研制出了喷漆、点焊、弧焊和搬运等作业机器人整机，几类专用和通用控制系统及几类关键元部件的主要性能指标达到 80 年代初国外同类产品水平，并且形成小批量生产能力。从 20 世纪 90 年代初期起，我国的工业机器人又迈出了一大步，通过“八五”、“九五”和国家“863”计划支持的应用工程开发，第一代工业机器人设计、制造和应用技术已趋于成熟。目前已基本掌握了机器人操作机的设计制造技术、控制系统硬件和软件设计技术及运动学和轨迹规划技术，生产了部分机器人关键元器件，研制出喷漆、点焊、弧焊、装配、切割、包装、码垛、搬运等各种用途的作业机器人，并实施了一批机器人应用工程，建立了一批机器人产业化基地，锻炼和形成了一大批机器人研究开发应用队伍。我国的智能机器人在“863”计划的支持下，也取得了一大批科研成果，在机器人视觉、力觉、触觉、声觉等基础技术的开发应用上有了一定的发展^{[12][20][21]}。目前，我国工业机器人已应用于汽车、摩托车、机械制造、电子电器、工程机械、石油化工等行业^[24]。

但是，我国的工业机器人技术及其工程应用的水平与国外还有一定的差距。我国尚未形成真正的机器人产业，机器人产品品种少，应用范围窄，机器人标准化程度低，可靠性低于国外产品。与机器人产业发展密切相关的关键部件交流伺服电机、精密减速器还没有相应产业的支持，新产品开发主要依赖于国家科研计划及基金的支持，不能形成

研发面向市场、市场支持研发的良性发展。在应用规模上,我国到 2004 年底已安装的工业机器人台数为 7096 台,只占全世界装备总数的 0.84%,与国外发展水平有较大差距。而在多传感器信息融合控制技术、遥控加局部自主系统遥控机器人、智能装配机器人、机器人化机械等方面的开发应用则刚刚起步。目前我国机器人总体技术仅相当于国外 20 世纪 80 年代初的水平^{[24][25]}。

根据国内外机器人发展的经验和现状,结合当前国内经济发展的具体情况,我国的机器人技术将重点开展开放式机器人控制器、智能机器人和机器人化机械的开发研究;开展以机器人为基础的重组装配系统及其相关技术的开发研究^[25];加强工业机器人应用工程的发展,并围绕应用工程进行工业机器人新产品的开发,使之具有一定的规模化生产能力;加强多传感器融合及决策、通用型机器人编程语言的研究。重点解决我国已研制应用多年的示教再现型工业机器人的产业化前期关键技术,大力推进其产业化进程。

1.2 SCARA 机器人概述

机器人按照机械结构不同可以分为六类:直角坐标机器人(Cartesian robot/Gantry robot)、圆柱坐标机器人(Cylindrical robot)、球坐标机器人(Spherical robot)、关节型机器人(Articulated robot)、平面关节型机器人(SCARA robot)和并联机器人(Parallel robot)^[13]。关节型机器人与人的手臂相似,可以实现比较灵活的运动,且所占空间体积小,相对工作空间大,因此非常适合喷漆、点焊、搬运、装配、码垛等自动化作业,在工业领域中有着广泛应用。

1978 年,日本山梨大学的牧野洋(Makino)教授及其学生研制出一种 SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm) 机器人^[2]。与一般的关节型机器人不同的是,SCARA 机器人只在平面上具有很好的灵活性,而在与平面垂直的方向具有很高的刚性,因此非常适合垂直方向的装配作业,它在装配、搬运等作业中可以实现很快的速度和较高的效率。SCARA 机器人除具有普通的关节型机器人结构紧凑、工作空间大、操作灵活等优点外,同时,还具有较高的重复定位精度和较好的性价比,因此,目前很多工业机器人都采用 SCARA 设计方案。SCARA 机器人已经在国内外众多企业取得了广泛应用,大大提高了生产效率,并取得了较好的经济效益。

1.3 开放式机器人控制器

机器人控制器作为机器人的核心部分,对机器人的功能和性能起着决定性作用。目前商品化的机器人控制系统大多采用封闭结构的专用控制器:采用专用的计算机作为主

控计算机，使用专用的编程语言设计软件系统，并将控制算法固化在 ROM 中。这种专用系统结构封闭，通用性差，已越来越不能适应现代制造业柔性化、网络化生产的需求，而且还带来了生产成本高、扩展性差、不易维护等问题，在一定程度上阻碍了机器人产业的发展^{[17]-[19]}。因此，开发利用现有资源的开放式机器人控制器，降低机器人成本成为机器人发展的一个重要方向。

1.3.1 开放式机器人控制器的定义和特点

目前，国际上对于机器人控制器的开放性还没有明确的定义。IEEE 将开放式系统定义为：“一个开放式系统提供了使合理实现的应用程序运行于来自多个控制供应商的不同平台上及其他系统应用互操作的能力，并且具有一个用来与用户交互的持续的风格”。开放式机器人控制器是开放式系统的一种，因此符合以上定义。William E. Ford 总结了开放式机器人控制器的主要思想^[26]：

- (1) 使用基于非专用计算机平台（如 PC、SGI、SUN 等）的开放系统。
- (2) 使用标准的操作系统（如 Windows, Unix）和标准的控制语言（如 C 或 C++）。
- (3) 硬件基于标准总线结构（如 PCI, STD），能够与各种外围设备和传感器接口。
- (4) 使用网络策略，实现远程通讯，允许工作单元控制器共享数据库，并允许对机器人远程操作。

开放式机器人控制器具有可移植性、可扩充性、可交互性和可伸缩性等特征，它与传统的专用系统相比，具有一系列优点^{[16][17]}：

- (1) 机器人控制器的标准化和开放式设计，使得众多软件和硬件开发商可以为其开发符合接口标准的组件，从而实现市场资源的有效整合，缩短系统的开发周期，加快系统的功能升级，并大大降低采购成本。
- (2) 用户和第三方开发人员可以对开放式机器人控制器进行模块配置和设计修改，并根据需要进行系统软硬件扩充，因而提高了系统的柔性和灵活性。
- (3) 开放式机器人控制器基于非专用计算机平台，使用标准的操作系统和控制语言，因此通用性好，可移植性强，只需通过系统配置和参数设置，就可用于控制符合接口标准的不同厂家或型号的机器人，从而扩展了应用范围。
- (4) 开放式机器人控制器采用模块化设计，新产品的开发可以使用已经过测试、性能良好的子系统模块，这样可以减少开发的重复性，提高系统的安全性，降低开发成本。
- (5) 采用开放式机器人控制器，可以使系统的使用变得简单，并能通过远程网络

对系统进行维护，从而大大加快系统维护的速度，减少客户因系统停用检修而带来的损失，并能有效地减少系统的培训和维护成本。

1.3.2 开放式机器人控制器的研究发展现状

针对开放式机器人控制器，国外的研究工作主要集中于以下三个方面^{[27]-[34]}：

(1) 开放式机器人控制（ORC）结构的定义。主要工作集中在定义一个与实现平台无关的控制结构抽象模型，从而将复杂的机器人系统分解成若干个可处理的部分。Saridis 教授提出了一种基于分层递阶控制结构的智能机器结构^[27]，它由组织层、协调层和执行层三个层次组成，控制系统基于一种提高精度降低智能（IPDI）的原则。Barbera、Albus、Fitzgerald、和 Huang 等在 RCS（Real Control System，实时控制系统）结构研究方面做了较多的工作^{[28]-[31]}，20 世纪 70 年代中期 Barbera 首先将 RCS 用于实验机器人控制，随后 Albus、Barbera、Huang 等人开始研究发展 RCS 结构，取得了很多研究和应用成果。RCS 结构可以用一棵包含多个可运算结点的树来描述，每个结点都包含任务分解、环境建模、传感器处理、数值判断和知识库等五个基本元素。RCS 结构自上而下实现任务分解下达，自下而上实现传感器信息反馈^{[28]-[30]}。美国 NASA/NBS 的标准参考模型（NASREM）^[32]就采用了 RCS-3 结构，从概念结构上将控制层分成三个等级：任务分解、环境建模和传感器处理，它们由通讯系统和全局内存支持。Huang 在综合各种层次模型概念的基础上，提出了一种多维参考模型结构来描述 RCS^[31]，并用一个集成坐标系统来表示，坐标系的三个轴分别是：权限层、功能分解层和继承层。其中权限层被分为六级，功能分解层的结点又包括任务分解、环境建模、传感器处理和数值判断功能，这四种功能遵循一定的交互规则。K.Nilson 认为开放式机器人控制应该基于分层结构，并从用户的角度把系统划分为任务级编程、离线编程、在线编程、执行、应用控制、运动控制、手臂控制和电机控制九个层次^[33]，并在此基础上提出了开放式机器人控制器的结构。该结构把上述九个层次分为用户级、系统级和伺服级。

(2) 开放式机器人控制器的硬件平台。开放式机器人控制器的硬件平台可大致分为两类：基于 VME 总线的系统和基于 PC 总线的系统。采用通用 PC 作为机器人控制器，具有成本低、开放性好、软件资源丰富、开发环境完备、通讯功能强、用户基础广泛等优点^{[17][18]}。因此，很多公司都把基于 PC 的机器人作为主要发展方向。目前，美国机器人工作空间技术（RWT）、EPSON 公司、安川公司、Robotic Workspace 公司和 DENSO 公司等设计出了基于 PC 的开放式机器人控制器。

(3) 开放式机器人控制器的软件系统。基于标准操作系统(如 Windows 操作系统)、采用面向对象的标准开发工具开发的软件系统具有较好的可交互性、可移植性、可扩展性和可升级性^[34],因此成为目前开放式控制器软件系统的主要发展方向。Trellis Software & Control 公司基于实时操作系统 LynxOSTM 开发了一系列运动控制软件模块 NOMAD,它可以与通用计算机硬件和软件组合,构造开放结构的机器人控制器。卡-梅大学(Carnegie Mellon University CMU)开发了基于传感的机器人动态可重构软件,其设计思想是将面向对象的设计技术与数控系统的端口设计技术结合起来。CIMETRIX 公司研究的开放式控制器 ROBOLINE 建立在标准工业平台上,使用 Client/Server 模型连接应用编程环境和底层控制功能^[19]。EPSON 公司基于 Windows 2000 操作系统和工业 PC 开发生产了 RC420、RC520 控制器,它允许用户将自己创建的动态链接库添加到控制器的 SPEL+语言中,也允许用户使用第三方软件和硬件。

我国在开放式机器人控制器方面也开展了一些研究工作。中国科学院自动化研究所开发的基于工业 PC 和 Windows 操作系统的开放式机器人控制器,具有运动控制、多坐标变换、示教再现等功能^[19]。中国科学院沈阳自动化研究所开发出了基于 PC 平台的弧焊机器人控制器,成功实现了对平面多关节装配机器人、点焊、弧焊机器人及移动机器人的控制。沈阳新松机器人自动化股份有限公司开发的基于工业 PC 的机器人控制器,目前已作为 RH6-A 弧焊机器人的配套控制器批量生产。

1.4 本课题研究意义

工业机器人的应用对于改变传统生产模式,全面提升企业的综合竞争力具有重大作用^{[9][12][36]}。随着我国加入 WTO 和经济全球化的发展,市场竞争变得更加剧烈,迫切需要我国制造业进行大规模的技术改造和设备更新,因而对工业机器人技术和自动化生产设备的需求也将不断增加。但我国机器人产业步伐较慢,工业机器人长期大量依赖进口。从国外引进的机器人自动化生产设备不仅价格昂贵,而且使用效果很不理想,由此严重制约了我国制造业的健康发展。据统计,2004 年以前已经引进的自动化生产设备中,有近一半处于不能正常运行的状态,其中问题较大的占 33%,根本不能使用的高达 16%。造成这种问题的主要原因包括:国外自动化系统不适合国内企业的工艺现状、系统选型不合理、缺乏足够的售前和售中技术支持、售后服务跟不上等^[37],而机器人控制系统结构封闭是导致机器人价格昂贵、售后服务不完善、机器人技术研究应用发展缓慢的根本原因。因此,研究和设计自主知识产权的基于开放式控制器的工业机器人具有非常重要的意义。

本课题将基于工控机、单片机和 Windows 2000 操作系统,以 SCARA 机器人为研究对象,采用 C++ Builder 作为开发工具,设计制作高性能、低成本、开放式的 SCARA 机器人控制器,并基于该控制器,利用现有资源设计制作出通用型 SCARA 机器人,从而在一定程度上改变我国大量引进国外机器人技术及生产设备的现状。本课题的研究,对于推动机器人理论和技术的发展及应用,加快我国机器人产业化的步伐,促进我国制造业整体水平的提高将具有重要的理论和实际意义。

1.5 本文研究的主要内容

本论文从国内外对 SCARA 机器人的需求出发,选择工控机作为计算机平台,基于 Windows 2000 操作系统,利用现有资源,对开放式 SCARA 机器人控制器和机器人样机进行研究和设计。首先建立 SCARA 机器人控制器的体系结构,并基于该体系结构设计机器人控制器的硬件系统。同时建立 SCARA 机器人的机械结构模型,根据机械结构模型设计机器人本体的三维模型和二维图,并加工制作机械部件,完成机器人本体的装配和调试。最后完成机器人控制器的软件系统设计和 SCARA 机器人实验。本论文研究的主要内容具体包括:

(1) 建立以工控机作为上位机,多个 STC89C51 单片机系统作为下位机的二级分布式机器人控制器体系结构。其中,上位机实现人机界面、轨迹规划、运动控制和状态监测等功能;下位机通过 PCL-731 数字 I/O 卡与上位机通讯,通过伺服电机驱动器驱动伺服电机,实现接收上位机指令、驱动机器人关节运动等功能。

(2) 建立 SCARA 机器人的机械结构模型。SCARA 机器人由固定架、基座、升降臂、大臂、小臂和末端执行器六部分组成,包括一个移动关节和三个旋转关节。各关节采用伺服电机驱动。

(3) 使用 Pro/ENGINEER Wildfire 2.0 完成 SCARA 机器人本体的三维建模,并使用 AutoCAD 和 Pro/ENGINEER 设计机械部件的二维图,根据二维图和三维数模图加工、制作主要机械部件,完成 SCARA 机器人本体的装配和调试。

(4) 设计单片机控制系统硬件电路,并制作单片机控制电路板,完成伺服电机驱动器的主电路配线和机器人控制器硬件电路的配线。

(5) 采用 C++ Builder 和汇编语言设计 SCARA 机器人控制机器人界面计算机控制系统和单片机控制系统,并对硬件系统和软件系统进行综合调试。

(6) 完成 SCARA 机器人的工作稳定性实验、点位运动实验和连续运动实验,通

过实验检验 SCARA 机器人控制器及样机的稳定性、开放性和功能性。

1.6 本章小结

本章在查阅大量国内外文献资料的基础上，综述了工业机器人技术的发展及研究现状，介绍了 SCARA 机器人的特点，分析了开放式机器人控制器的特点、研究现状和发展趋势，阐明了本课题的研究意义和主要研究内容。

第二章 SCARA 机器人本体设计

SCARA 机器人主要由机器人本体、控制器和传感检测装置三部分组成，其中，机器人本体又包括操作机（机械本体）和机械传动系统^{[2][11][38]}。图 2.1 为 SCARA 机器人的结构简图。控制器是机器人的大脑，负责实现人机交互、轨迹规划、运动控制和状态监控等功能。机械传动系统在控制器的运动指令控制下，驱动机器人机械本体各关节、升降臂、大小臂和末端执行器运动，实现指定动作。安装在机械本体上的传感检测装置是机器人的神经单元，它可以实时检测各关节的移动、转动量和位置信息，并将这些信息反馈给控制器，从而实现控制器对机器人的准确、安全控制。

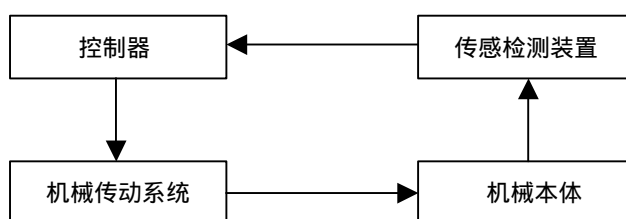


图 2.1 SCARA 机器人的结构简图

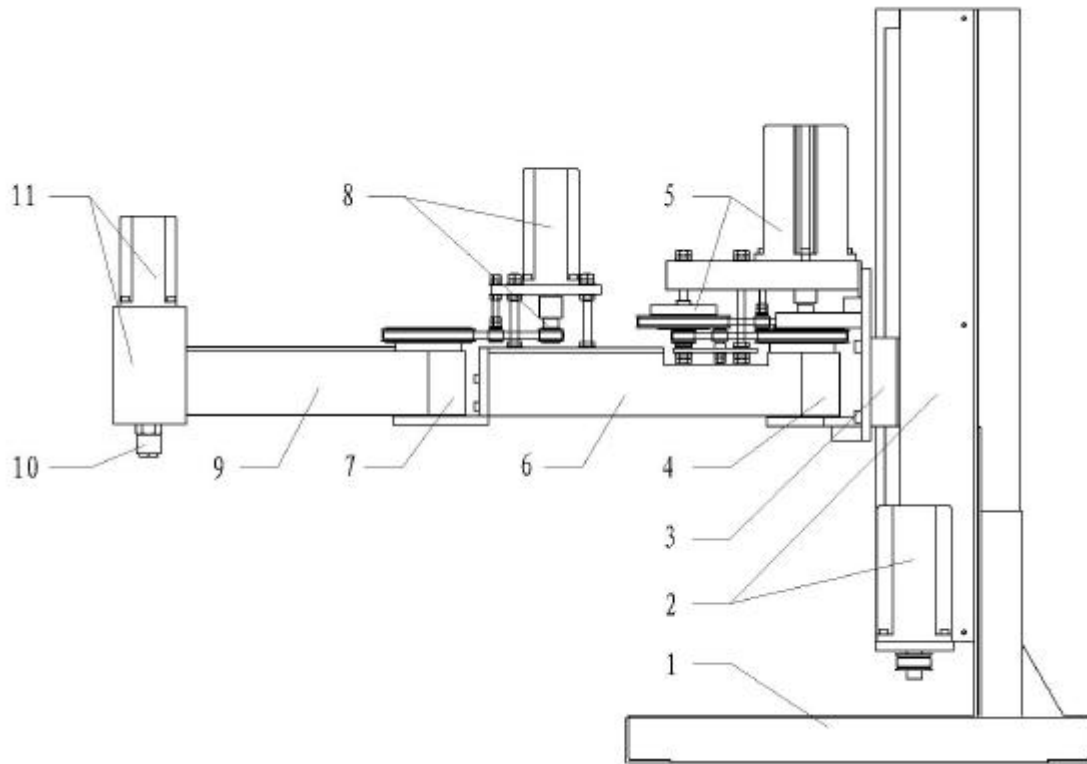
Fig. 2.1 The drawing of SCARA robot's structure

机器人本体是 SCARA 机器人的重要组成部分，它是机器人作业任务的执行机构，用于完成机器人的所有功能动作。机器人本体的设计合理性、可靠性直接影响到整个 SCARA 机器人的功能和性能。本章将基于模块化设计的思想，对 SCARA 机器人本体进行分析，给出 SCARA 机器人本体的设计方案，并予以实现，同时对传感检测装置进行设计。

2.1 SCARA 机器人本体的基本结构

SCARA 机器人有两个轴线相互平行的旋转关节，以实现平面内的灵活定位。同时，SCARA 机器人还应有一个移动关节，以实现在与平面垂直的方向上的移动和定位。在装配、搬运等作业中，要求 SCARA 机器人的末端执行器抓住工件以后，能够对工件的方向状态进行调整，因此，在末端执行器上还应有一个旋转关节。所以我们设计的 SCARA 机器人具有 4 个自由度，包括 3 个旋转关节和 1 个移动关节。

SCARA 机器人本体的基本结构简图如图 2.2 所示。SCARA 机器人本体由机架、基座、升降臂和升降关节、大臂和大臂关节、小臂和小臂关节、末端执行器和末端执行器关节及各关节驱动装置等几部分组成。其中，升降关节用于驱动升降臂在与平面垂直的



1. 机架 2. 基座及升降臂关节驱动装置 3. 升降臂及关节 4. 大臂关节 5. 大臂关节驱动装置 6. 大臂
7. 小臂关节 8. 小臂关节驱动装置 9. 小臂 10. 末端执行器 11. 末端执行器关节及驱动装置

图 2.2 SCARA 机器人本体的基本结构简图

Fig. 2.2 Draft drawing of the basic structure of SCARA robot's manipulator

方向移动，完成机器人主体的升降运动。大臂和小臂关节轴线相互平行，分别用于驱动大、小臂绕各自关节的轴线旋转，从而实现末端执行器在平面内定位。末端执行器关节的旋转可以完成工件或末端执行器在平面内定向。

2.2 SCARA 机器人本体的设计分析

2.2.1 机器人本体的设计原则

SCARA 机器人作为一种机电一体化系统，其机器人本体的设计应遵循机电一体化系统中机械系统的一般设计原则。因此，为确保机械系统的传动精度和工作稳定性，在机器人本体的设计中，应做到以下几方面^{[39][40]}。

- (1) 减小或消除传动间隙。如采用预紧的方法消除丝杠螺母传动中由于弹性变形或磨损而引起的间隙。
- (2) 提高刚度。应选用刚度较好的材料，并合理选择臂部截面形状和轮廓尺寸。
- (3) 增加抗振性。提高静刚度，增加阻尼、提高固有振动频率等措施都可以增加系统的抗振性。

(4) 减少摩擦。采用低摩擦阻力的传动部件和导向支承部件,如采用滚珠丝杠副、动压导向支承等。

(5) 减轻重量,缩小体积使结构紧凑。如选用高强度轻型复合材料。

与一般的机电一体化系统机器相比,SCARA 机器人又有其独特的机械结构。SCARA 机器人本体可以简化成各连杆通过关节首尾相连接、末端无约束和支撑的开式连杆系,因此结构刚度不高,整体动态性能受惯量影响很大^[2]。所以我们选用轻型高强度铝合金作为主要材料来加工制作大小臂和末端执行器,以减轻重量,降低惯量,从而改善机器人本体的动态性能^[41]。

2.2.2 机器人本体的模块化设计

随着机器人应用领域的不断扩大,机器人产品也正在向多品种、小批量、低成本等方向发展,这就对机器人本体的设计和生产提出了新的要求。机器人本体的设计应尽可能标准化、模块化,以缩短开发和生产周期,降低生产成本。采用模块化设计还可以有效地提高设计的重用性,增加系统的可靠性,并能根据客户需要对系统进行合理配置,从而满足市场的不同需求^[42]。SCARA 机器人本体的大臂和小臂关节都是旋转关节,用于实现在同一平面内的定位,而大臂和小臂也具有相似的功能,因此,我们将采用模块化设计的思想,对大臂、小臂、大臂和小臂关节及其驱动装置设计相同的模块结构。

2.2.3 三维 CAD 技术与机器人本体建模

CAD(计算机辅助设计)技术的发展和应用对现代制造业产生了重要影响。它采用计算机技术作为辅助工具,帮助工程设计人员进行产品设计,从而使设计人员摆脱了繁琐、费时、低效、绘制精度低的传统手工绘图,减轻了设计人员的劳动强度,极大地提高了设计效率,缩短了产品的设计周期和制造周期,提高了产品的整体质量,因此在机械、电子、汽车、飞机、船舶、建筑等行业取得了广泛应用,成为现代工程设计领域的一项关键技术。早期的二维 CAD 技术的主要作用是计算机辅助绘图,采用二维 CAD 技术绘制的工程图不能完全表达设计人员的设计思维,对于零件的材料、颜色、形状、硬度等信息的表达,二维 CAD 技术无法实现。而且二维图在很多情况下不能完整、唯一地表达信息,且不直观,从而给绘图、看图带来了困难。因此,三维 CAD 技术应运而生。三维 CAD 技术符合人们的设计思维习惯,它可以直观、完整地表达零件的信息,有效地提高产品设计的效率,而且还可以完成装配干涉分析、空间运动分析、质量属性分析、有限元分析、二维工程图自动生成、可加工性分析等工作,因此很快得到了推广

和应用。三维 CAD 已成为产品设计的一项重要技术^{[43]-[45]}。

目前，三维 CAD 领域主要有三大主流系统：PTC 公司的 Pro/ENGINEER、EDS 公司的 UG 和达索公司的 CATIA。Pro/ENGINEER 是一款基于特征的专业三维 CAD 软件，它具有三维造型设计、自由曲面设计、二维生产绘图、文档数据管理、计算机辅助制造、仿真和分析等强大功能。Pro/ENGINEER 首次提出了参数化设计的概念，并且基于特征建模的思想，采用单一数据库来解决特征的相关性问题，从而极大地提高了产品设计的灵活性，并使设计数据得到了充分利用，这些优点与其自身的强大功能相结合，有效地提高了产品开发和设计的效率，缩短了产品的开发、设计和制造时间，降低了生产成本，因此在工业设计、制造领域中取得了广泛的应用^{[46]-[49]}。

三维建模是机器人本体设计的重要环节。利用 Pro/ENGINEER 三维 CAD 软件可以对 SCARA 机器人本体的各机械部件进行快速设计和装配，建立三维模型。同时，还可以根据需要对机器人本体的装配干涉、空间运动、质量属性、动态性能等进行分析和仿真。因此，我们选用 Pro/ENGINEER Wildfire 2.0 进行 SCARA 机器人的机械系统设计，同时采用 Pro/ENGINEER 与 AutoCAD 设计二维工程图。

2.3 SCARA 机器人的驱动方案

2.3.1 机器人的驱动方式

常用的机器人驱动方式主要有液压驱动、气压驱动和电气驱动三种^{[2][10][39]}。

1) 液压驱动。液压驱动以液体作为工作介质，通过将电能转换为液压能并用电磁阀改变压力油的流向，从而使液压驱动执行机构运动。液压驱动输出功率大，精度高，速度快，运行平稳，但它需要独立的液压源，且液体易泄漏，设备难于小型化，因此不能满足机器人驱动装置重量轻、体积小的要求。

2) 气压驱动。与液压驱动的工作原理相似，气压驱动采用压缩空气作为工作介质，具有工作速度快，成本低，无泄漏污染等特点，但功率较小，动作不够平稳，且不易小型化，难于实现精确控制。而机器人一般需要有较高的工作精度和较大的驱动功率，因此气压驱动作为机器人的驱动方式也具有一定的局限性。液压驱动和气压驱动多用于早期的工业机器人，最早的 UNIMATE 机器人就是采用液压驱动方式工作。

3) 电气驱动。它是将电能转变成电磁力，并用该电磁力驱动执行机构运动的。电气驱动的功率大，控制精度高，响应快，且操作简便，无污染，这些特点较好地满足了机器人的设计要求，因此，电气驱动成为目前机器人的主要驱动方式，其中，控制用电

机是最常用的执行元件。

2.3.2 控制用电机的种类、特点和选型

为了减小机器人的体积，减轻驱动装置重量，同时满足控制精度要求，我们选择电气驱动作为机器人的驱动方式，并选用控制用电机作为驱动元件。控制用电机又可分为步进电机、直流伺服电机和交流伺服电机三种。它们具有不同的特点^{[10][39]}。

(1) 步进电机。又称电脉冲马达，它是将电脉冲信号转换成机械角位移的执行元件，其转子的角位移大小和转速分别与输入的电脉冲数及频率成正比。步进电机没有长期的积累误差，定位精确，不易丢步，且成本低，控制结构简单，控制性能好，因此被广泛应用于开环结构的机电一体化系统。

(2) 直流伺服电机。直流伺服电机通过电刷和整流子产生的整流作用，使磁场磁动势和电枢电流磁动势正交，从而产生转矩。它具有较高的响应速度、精度和频率，具有优良的控制特性，但其机械结构复杂，而且由于使用电刷和整流子，所以寿命较短，需要定期维修。

(3) 交流伺服电机。交流伺服电机通过检测气隙磁场的大小和方向，用电力电子变换器代替整流子和电刷，并通过与气隙磁场方向相同的磁化电流和与气隙磁场方向垂直的有效电流来控制其主磁通量和转矩。它具有运转平稳可靠、输出力矩恒定、过载能力强、加速和动态性能好等特点，而且由于采用闭环控制，因此可以获得很高的控制精度和可靠的控制性能。交流伺服电机已经在工业自动化控制领域取得了广泛应用。

为满足 SCARA 机器人运行速度快、控制精度高和动态性能好的设计要求，我们选用日本 YASKAWA（安川）公司的 Σ -II 系列交流伺服电机作为驱动元件，并选用与伺服电机配套的伺服电机驱动器来控制电机的运转。表 2.1 列出了选用的交流伺服电机的型号、规格及配套的驱动器型号^[50]。

表 2.1 交流伺服电机的型号、规格及配套的驱动器型号

Table 2.1 Type and specification of AC servo motors and type of matched servos

机器人关节名称	电机型号	配套伺服驱动器型号	额定输出	额定扭矩	瞬间最大扭矩	额定电流	额定转速	编码器	编码器脉冲数	重量
			kW	N·m	N·m	A (rms)	Min ⁻¹			
升降臂及大臂关节	SGMAH-08A	SGDM-08ADA	0.75	2.39	7.16	4.4	3000	13比特增量型	2048	3.4
小臂关节	SGMAH-04A	SGDM-04ADA	0.4	1.27	3.82	2.8				1.7
末端执行器	SGMAH-02A	SGDM-02ADA	0.2	0.637	1.91	2.1				1.1

2.4 升降关节的设计

SCARA 机器人的升降移动关节用于驱动机器人主体部分作升降直线运动，从而实现末端执行器在垂直方向的定位。常用的直线驱动方式主要有液压驱动、气压驱动、直线电机驱动、旋转电机与丝杠螺母副联合驱动等。滚动丝杠螺母具有传动摩擦力矩小、传动效率高、结构紧凑、刚性好、传动精度高、工作寿命长等特点，在机电一体化系统中取得了广泛应用，而滚动导轨副精度高，摩擦系数小，润滑方便，使用寿命长^{[39][51][52]}，因此，我们采用滚动丝杠螺母机构和滚动导轨副设计 SCARA 机器人的升降关节。

图 2.3 为设计的 SCARA 机器人的升降关节及升降臂三维模型。机器人的基座上安装一个滚珠丝杠、一个电机和两个滚动导轨，滚珠丝杠的两端通过轴承固定在基座上，升降臂与滚珠丝杠副的螺母及滚动导轨副的定导轨通过螺栓连接在一起。当电机转动时，

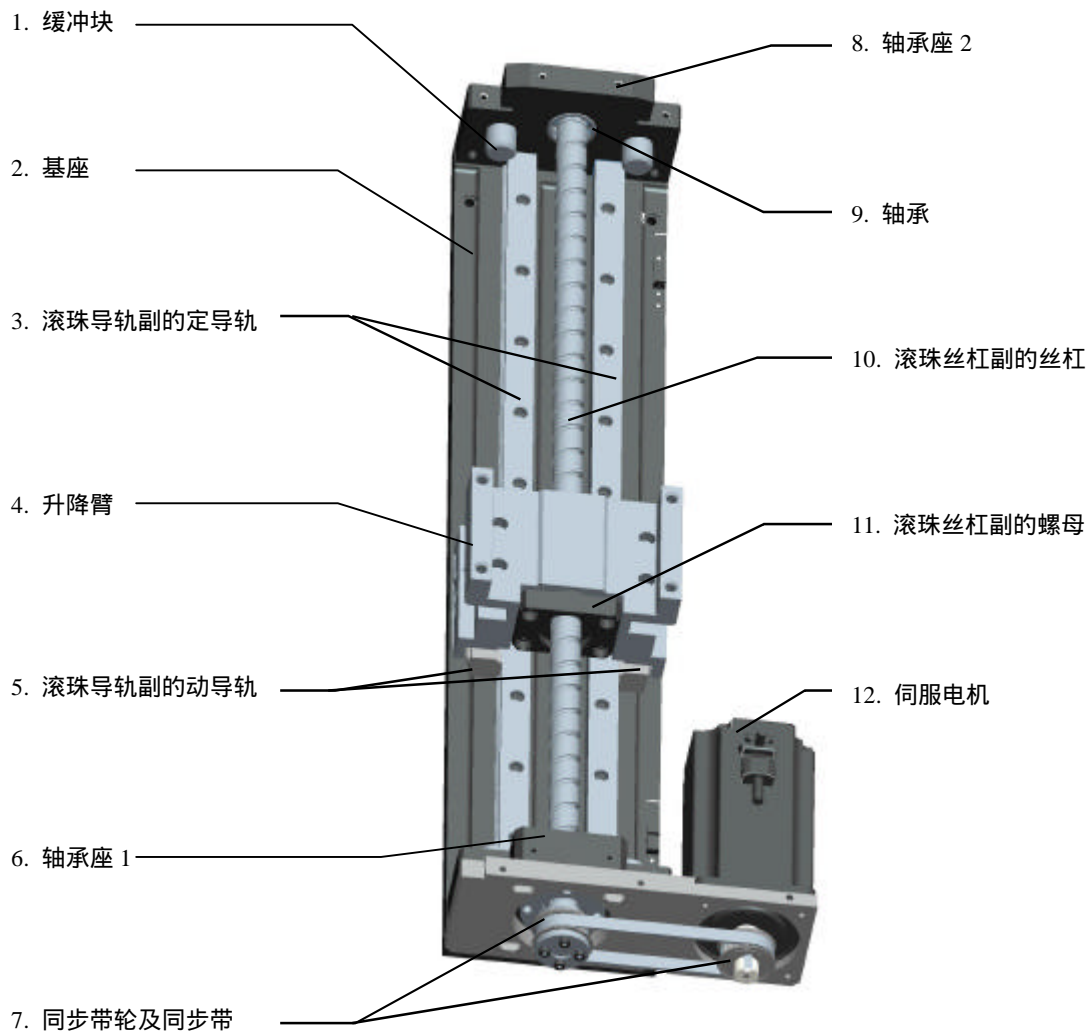


图 2.3 SCARA 机器人升降关节及升降臂三维模型

Fig. 2.3 The 3-dimensions model of SCARA robot's elevating joint and arm

电机的输出轴通过同步带传动带动滚珠丝杠转动，从而驱动滚珠丝杠副的螺母沿丝杠轴线方向作直线运动，实现升降臂的升降动作。

2.5 大小臂模块设计

基于模块化设计的思想，机器人本体的大小臂和关节采用相同的模块结构。由于 SCARA 机器人相当于开链式连杆结构，其臂部、关节和末端执行器的重量对机器人的整体动态性能有着重要影响，因此，除采用轻型高强度铝合金材料外，还应设计重量较轻、刚性较好的机械结构。在对臂部模块及关节的设计中，我们尽可能采用板块结构，以减轻重量，并利于加工。

2.5.1 臂部模块的设计

设计的机器人臂部模块由多块铝合金板材通过螺栓连接组合而成，如图 2.4 所示。其中，两块侧板和一块上板构成臂部模块的主体，两至三块中间板通过螺栓与两块侧板固定在一起，以增强臂部的刚度。这种模块结构具有重量轻、刚性好等特点，且易于加工和装配，从而优化了系统的设计。大臂和小臂都采用这种模块结构，所不同的是，大臂比小臂长 100mm。

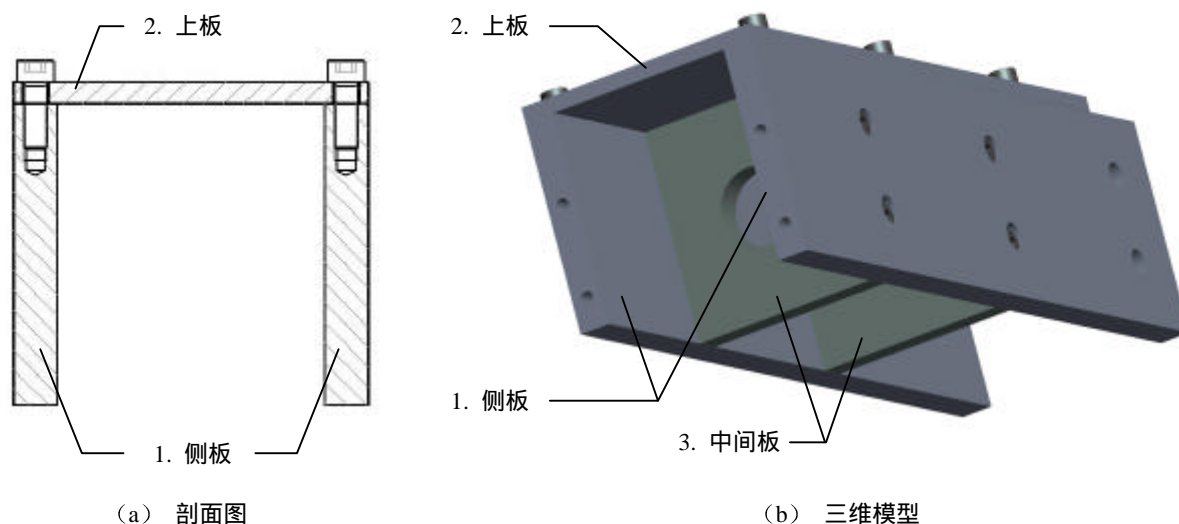
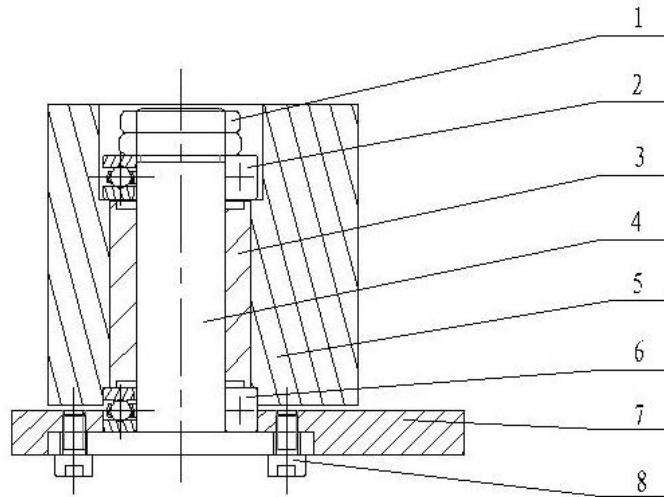


图 2.4 SCARA 机器人的臂部模块

Fig. 2.4 The model of SCARA robot's arm

2.5.2 臂部关节的设计

图 2.5 为设计的臂部关节的装配图。旋转支撑轴通过螺栓固定在底板上，支撑轴上安装有两个平面推力球轴承和一个直线轴承，直线轴承在两个推力球轴承的中间，并与



1. 螺母 2. 推力球轴承 1 3. 直线轴承 4. 旋转体支撑轴 5. 臂部旋转体 6. 推力球轴承 2 7. 底板 8. 螺栓

图 2.5 SCARA 机器人的臂部关节装配图

Fig. 2.5 The Assembly Drawing of SCARA robot's arm joint

推力球轴承 1 的上表面接触，推力球轴承 1 的下表面与支撑轴的上表面相接触。臂部旋转体安装在直线轴承上，并与推力球轴承 1 的上表面和推力球轴承 2 的下表面相接触。两个薄形螺母用于固定推力球轴承 2。臂部旋转体绕旋转支撑轴旋转，实现关节动作。为了使臂部关节在工作空间内不与臂部安装板发生碰撞，臂部旋转体一边设计成半圆形，而另一边设计成方形，以便于与臂部模块相连接。臂部旋转体钻有四个沉孔，用于实现旋转体与臂部关节驱动部件的连接。

2.5.3 臂部驱动装置的设计

电机属于高转速、低扭矩的驱动设备。为获得较高的输出力矩，可以选用较大功率的电机，但这势必会增加电机重量，从而影响机器人的整体动态性能，同时也会增加生产成本。增大力矩的另一种方法是采用丝杆螺母、齿轮齿条、带及带轮或减速器等中间传动机构。减速器传动具有变速范围大、精度高等优点，在传动系统中有着广泛应用。而采用同步带及带轮传动成本低，工作噪音小，且易于安装，这两种传动方式都能满足机器人本体设计重量轻、工作空间大等要求，因此我们考虑采用减速器或同步带传动方式，并对这两种传动方式进行了设计和分析。

行星齿轮减速器传动

输出力矩大、精度高的减速器一般价格比较昂贵，因此，我们自行设计了行星齿轮减速器，其传动简图如图 2.6 所示。其中，系杆 H 是输入端，与电机相连，齿轮 1 是输出端。传送比设计为 $\frac{1}{49}$ ，即 $i_{1H} = \frac{1}{49}$ 。根据行星轮系传动比的计算公式^[53]，

$$i_{nH} = 1 - i_{nm}^H$$

式中, m 为不动齿轮的编号, 这里 $m=3$ 。因此

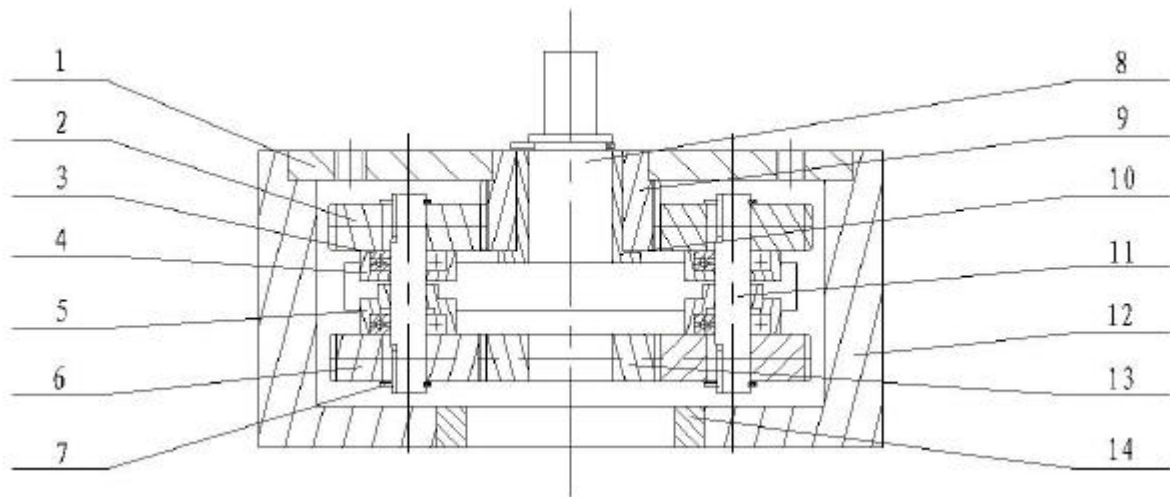
$$i_{13}^H = \frac{z_2 z_3}{z_1 z_2'} = \frac{48}{49}$$

我们将 4 个齿轮的齿数
分 别 选 择 为 :

$$z_1 = 49, z_2 = 42, z_2' = 42, z_3 = 48$$

。模数选择 $m=0.6$ 。由于 $z_1 + z_2 \neq z_2' + z_3$, 使得中心距不一致, 因此需要对齿轮进行角度变位修正。齿轮 1 和齿轮 2 不变位, 齿轮 2' 和齿轮 3 作变位修正。经计算^[52], 其变位系数分别为 0.27 和 0.2502。

设计的行星齿轮减速器内部结构如图 2.7 所示。齿轮 3 通过 4 根销钉与减速器上盖固定在一起, 齿轮 3 内孔上安装一铜套, 系杆通过该铜套安装在上盖上, 并可在铜套内转动。系杆的两边孔安装有四个深沟球轴承, 用于安装齿轮轴, 以实现齿轮轴的灵活转动, 减小传动摩擦。齿轮 2 和 2' 通过齿轮轴同轴连接。齿轮 1 先与臂部旋转体的输入轴固定在一起, 再与减速器的齿轮 2 配合安装。



1. 上盖 2. 齿轮 2' 3. 深沟球轴承 4. 轴承套 1 5. 轴承套 2 6. 齿轮 2 7. 弹性卡圈
8. 系杆 9. 齿轮 3 10. 铜套 1 11. 齿轮轴 12. 腔体 13. 齿轮 1 14. 铜套 2

图 2.7 行星齿轮减速器装配图

Fig. 2.7 The Assembly Drawing of planet gear reducer

同步带及带轮传动

为满足大臂高传送比的要求，我们设计了两级同步带传动机构，其三维模型如图 2.8 所示。其中，固定板和固定轴用于固定传动机构，张紧轮 1 和张紧轮 2 用于消除同步带的传动间隙。小带轮 1 连接电机输出轴，电机安装在固定板 2 上，大带轮 2 连接臂部旋转体。小带轮 1 和大带轮 1 之间的传送比为 4:1，小带轮 2 和大带轮 2 之间的传送比也是 4:1，因此，该传动机构的传送比为 16:1。

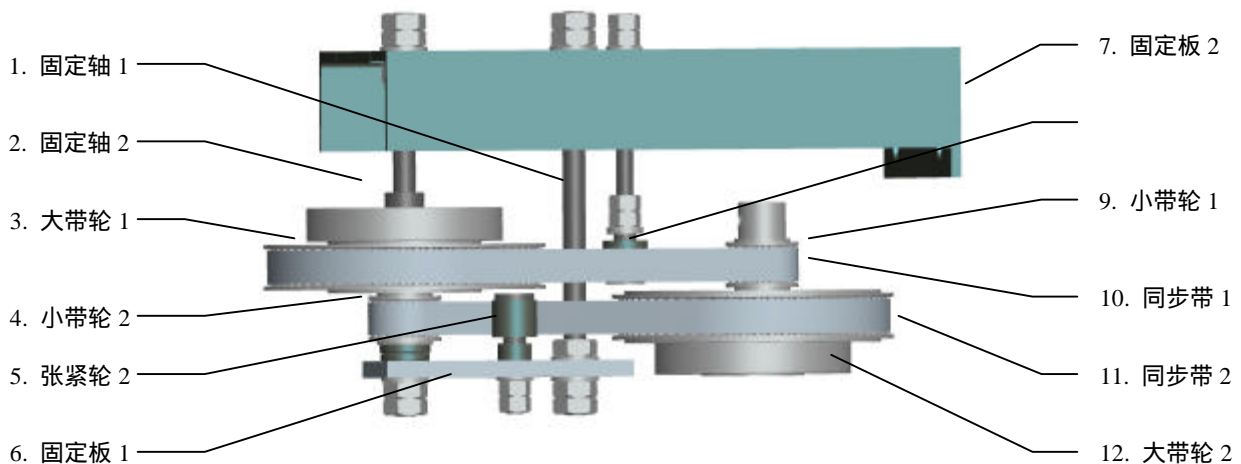


图 2.8 同步带传动机构三维模型

Fig. 2.8 The 3-dimension model of belt transmission mechanism

传动方案的比较与选择

采用行星齿轮减速器可以获得较高的传动比，但对减速器的加工制造精度要求较高，且安装过程中需要减速器、电机输出轴和臂部旋转体有很好的同轴度。而同步带传动机构易于制作和安装，制作成本低，且同步带和带轮都是标准件，易于购置，因此我们采用同步带传动方案。

图 2.9 为设计的大臂和小臂三维模型。臂部旋转体通过螺钉与臂部模块和传动机构的输出大带轮固定在一起，电机通过轴转换器与输入小带轮连接在一起，大臂和小臂的传动机构都通过张紧轮张紧同步带以消除传动间隙。其中，大臂关节采用两级同步带传动，传动比为 16:1，小臂关节采用一级同步带传动，传动比为 4:1。由于大臂关节需承受大臂、小臂、末端执行器及两个电机的重量，臂部关节支承的刚性不佳，在运动过程中会产生间隙，因此，我们在与大臂旋转体相连的同步带轮上增加了支承机构。该机构由环形套和固定板组成，环形套嵌入到大同步带轮的内孔中，固定板与大臂安装板通过螺栓固定在一起，大臂旋转体运动时，绕环形套和旋转体支撑轴旋转，因此，支承机构承受了大臂关节需承受的部分重量，并使大臂关节刚性增强，从而消除了支承刚性不

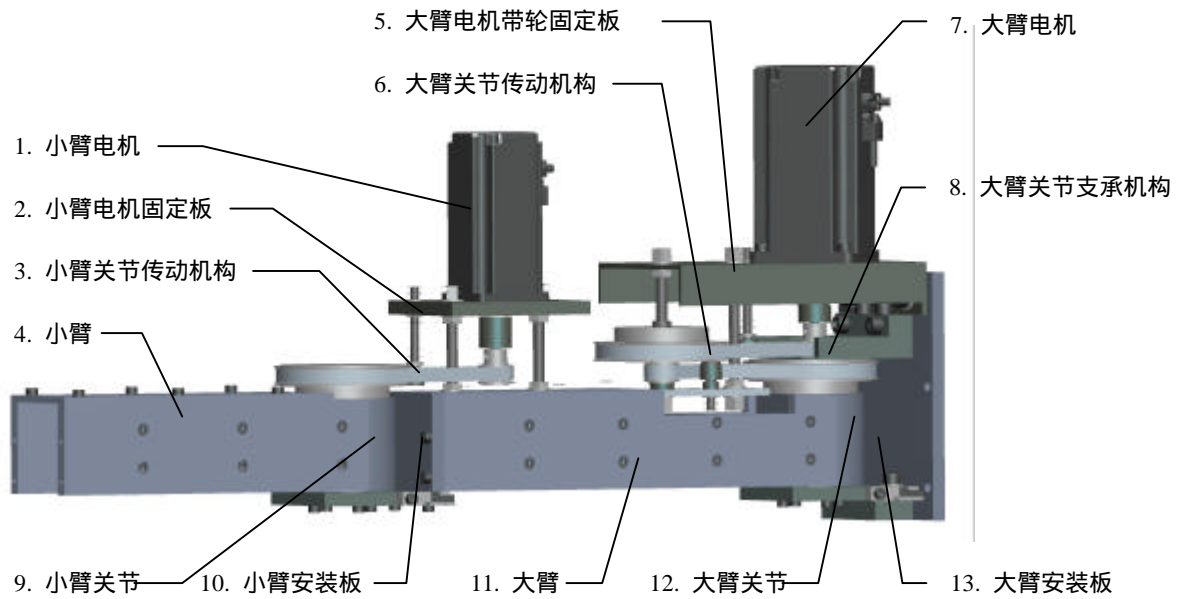


图 2.9 大臂和小臂三维模型

Fig. 2.9 The 3-dimension model of big arm and small arm

佳引起的传动间隙。

2.6 末端执行器的设计

为满足装配、搬运等不同作业的需要，我们设计了可更换夹持器的末端执行器，其三维模型如图 2.10 所示。其中，末端执行器安装板、底板、电机安装板和侧板构成了

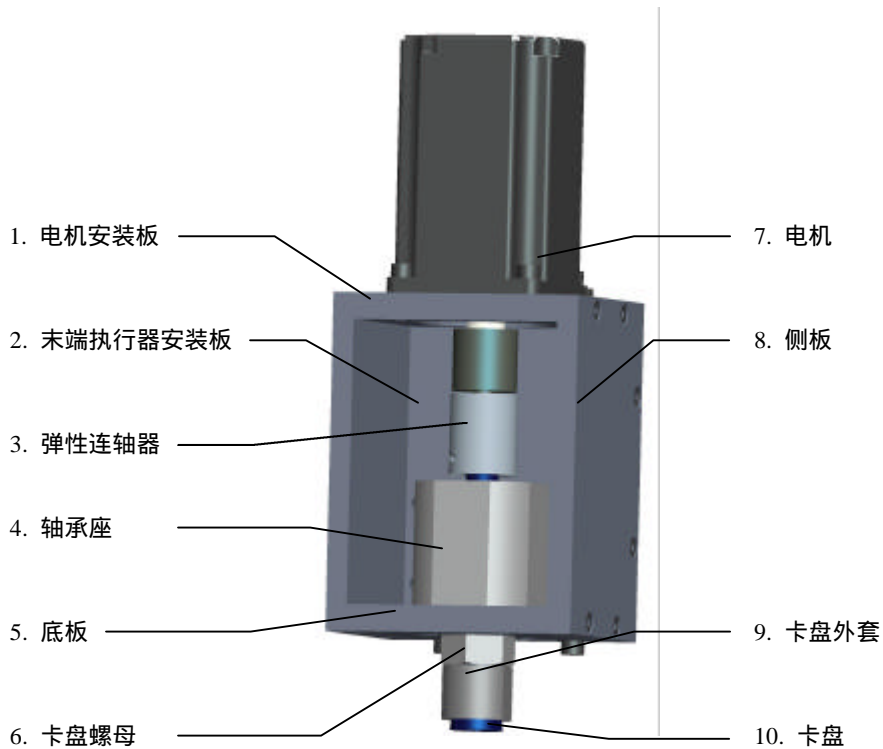


图 2.10 SCARA 机器人的末端执行器三维模型

Fig. 2.10 The 3-dimension model of SCARA robot's end-effector

末端执行器的主体框架，轴承座内安装有直线轴承和滚动轴承，用于支撑卡盘旋转轴。伺服电机安装在电机安装板上，其输出轴通过弹性联轴器与卡盘旋转轴相连。卡盘、卡盘外套和螺母用于固定夹持器。安装夹持器时，将夹持器固定端插入卡盘孔中，逆时针方向旋转螺母，使其推动卡盘套向下滑动，将卡盘合紧，即可将夹持器固定住。电机转动时，带动卡盘旋转轴旋转，并使安装在卡盘上的夹持器转动，从而实现末端执行器的功能动作。

2.7 机架的设计

SCARA 机器人本体一般通过机座或机架安装在固定工作地点。在进行机座或机架设计时，应满足以下基本要求^[39]：

- (1) 机座或机架应具有足够的刚度，以承载整个机器人本体，并具有较好的抗振性。
- (2) 应具有较好的稳定性。
- (3) 尽量减少热变形。
- (4) 节省材料，降低成本，并尽可能缩短生产周期。

焊接机架与机座相比，具有重量轻，改型快，生产周期短，成本低等优点，且其较轻的重量可以提高固有频率，从而提高机架的抗振性。因此，我们采用角铁焊接的机架来支撑机器人本体。图 2.11 是设计的 SCARA 机器人机架的三维模型。

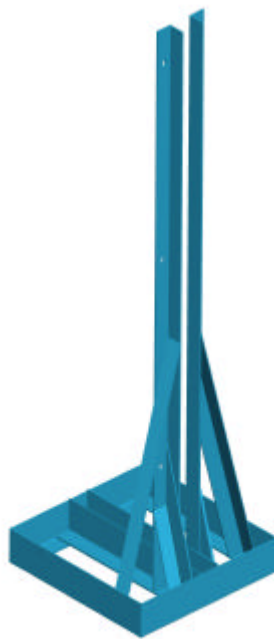


图 2.11 SCARA 机器人机架的三维模型

Fig. 2.11 The 3-dimension model of SCARA robot's frame

2.8 机器人本体的三维模型

对机器人各部件进行装配，形成 SCARA 机器人本体的三维模型，如图 2.12 所示。

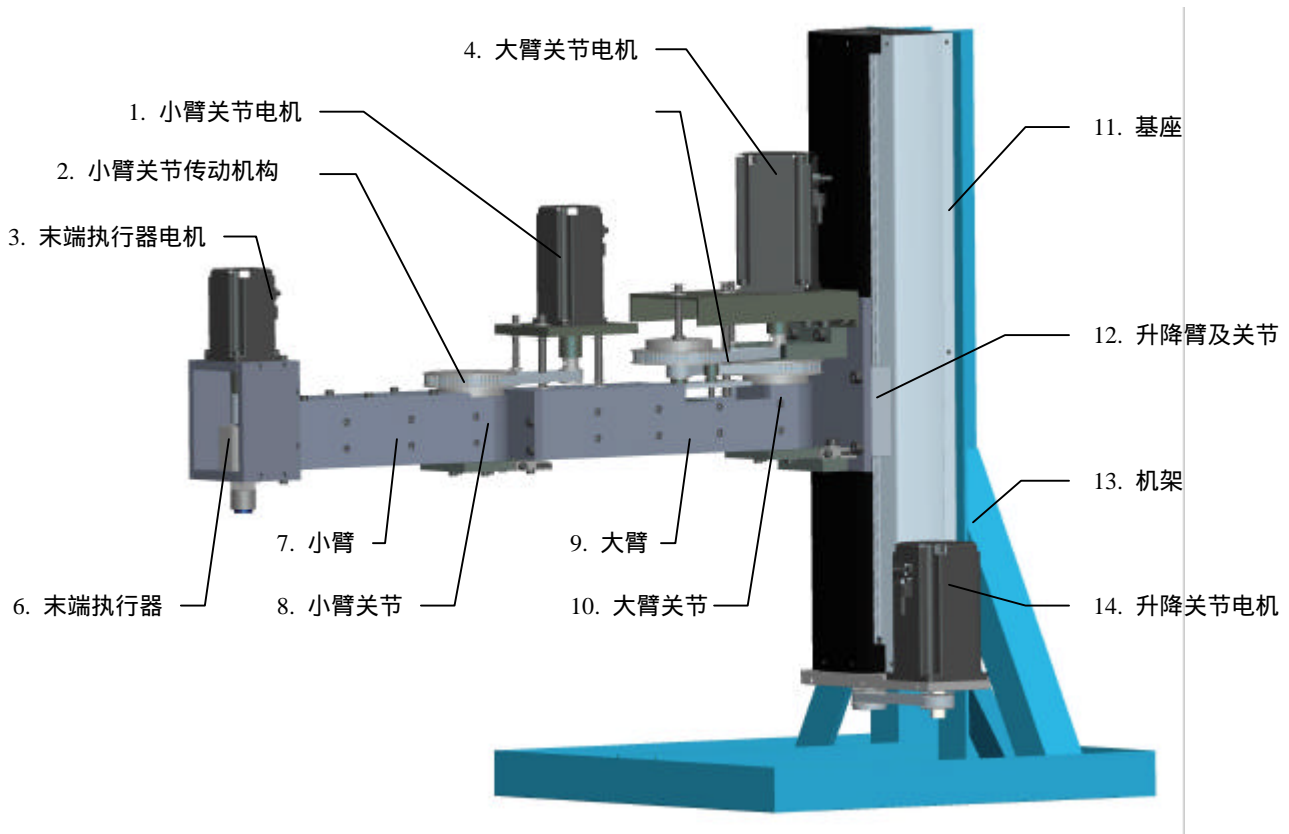


图 2.12 SCARA 机器人本体的三维模型

Fig. 2.12 The 3-dimension model of SCARA robot's manipulator

2.9 机械部件加工与机器人装配

我们使用 Pro/ENGINEER 的工程绘图功能，根据设计的 SCARA 机器人三维模型，生成二维工程图，并采用 AutoCAD 软件对图纸进行修改和关键尺寸、公差标注。然后根据二维工程图和三维数模图加工各机械部件，并购置标准件。最后对机器人本体进行装配和调试。

图 2.13 为装配完成的 SCARA 机器人本体。



图 2.13 SCARA 机器人本体

Fig. 2.13 SCARA robot's manipulator

2.10 SCARA 机器人的传感器

传感器是机电一体系统的重要组成部分，传感器的选用直接影响到系统的精度和稳定可靠性。机器人作为一种典型的机电一体化系统，主要在以下几方面对传感器提出了要求^[2]。

(1) 精度。传感器的精度直接影响到机器人的工作精度，因此，应根据系统的工作精度要求，选择适合精度的传感器。同时，还应考虑成本因素，在机器人工作精度得到保证的情况下，传感器的精度不宜选择过高。

(2) 重复性。对于具有示教再现功能的机器人，传感器的重复性非常重要，它直接关系到机器人能否准确再现其示教轨迹。因此，安装于这种机器人的传感器应具有较好的重复性。

(3) 重量和体积。对于安装在臂部或末端执行器的传感器，要求重量轻，以减小对系统的动态性能的影响。同时，机器人的体积和工作空间决定了传感器应具有较小的体积。

(4) 稳定性和可靠性。机器人要适应多种恶劣工作环境的要求，因此，要求传感

器具具有较强的抗干扰能力，同时要求传感器稳定性好，可靠性高，以保证机器人能够长期稳定的工作。

(5) 响应时间。为保证机器人具有较高的控制精度和较快的工作速度，要求传感器的响应时间越短越好。

我们选用感应式接近开关和增量型编码器作为 SCARA 机器人的主要传感装置。

2.10.1 电感式接近开关

接近开关是一种无需与运动部件进行机械接触而产生位置信号的位置开关，电感式接近开关是其中的一种。当金属物体接近电感式接近开关的感应区域时，开关就能无接触、无压力、无火花的迅速发出电气指令，准确反应出运动机构的位置和行程。与一般的机械行程开关相比，它具有精度高、速度快、抗干扰能力强、使用寿命长、安装方便等特点^[54]。

我们选用的 GXL-8FB 型接近开关是一种电感式接近开关，它不仅具有速度快、精度高等特点，而且体积非常小，长宽高为 $20\text{mm} \times 8\text{mm} \times 7.4\text{mm}$ 。该传感器有一个直径 2.6mm 的通孔，非常易于安装。我们在升降关节、大臂关节、小臂关节和末端执行器各安装了一个接近开关，用于限位和回零控制。图 2.14 为 GXL-8FB 型接近开关的电路图^[55]。

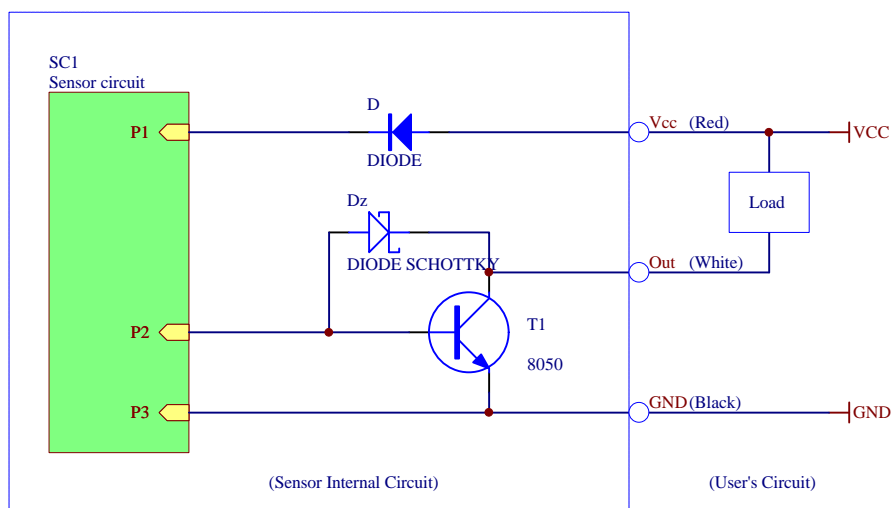


图 2.14 GXL-8FB 型电感式接近开关电路图

Fig. 2.14 The circuit diagram of GXL-8FB inductive proximity sensor

2.10.2 增量型编码器

选用的伺服电机自带 13 比特增量型编码器，与电机同轴安装，可实现电机的精确运动控制，其脉冲数为 2048 脉冲/转。伺服电机通过信号线将编码器的脉冲串行数据传

送至伺服电机驱动器，驱动器收到脉冲数据后，将其分频为设定好的脉冲数，通过 CN1 的 19、20 和 33-36 输出^[47]，上位装置读取这些输出信号，就可获取电机的旋转量。

2.11 本章小结

本章主要从以下几个方面对 SCARA 机器人本体进行设计和分析：

(1) 设计了 SCARA 机器人本体的基本结构，分析了机器人本体的特点 and 设计原则，选择轻型高强度铝合金作为大小臂及末端执行器的主要加工材料，从而减轻了机器人本体的重量，提高了系统刚度。

(2) 分析比较了三种常用机器人驱动方式的优缺点，选择电气驱动作为 SCARA 机器人的驱动方式，并选用伺服电机作为主要驱动元件，以满足 SCARA 机器人运行速度快、控制精度高和动态性能好的设计要求。

(3) 采用滚动丝杠螺母副和旋转电机相结合的驱动方式对 SCARA 机器人的升降关节进行设计，以减少传动摩擦，提高系统精度。丝杠螺母副与旋转电机之间采用同步带传动。

(4) 基于模块化设计的思想，设计了机器人本体的臂部模块和关节。在对行星齿轮减速器和同步带传动机构进行设计、分析和比较的基础上，选择同步带传动作为臂部关节的传动方式，并设计了大臂和小臂关节驱动装置。设计了可更换夹持器的末端执行器，以满足不同作业的需要。

(5) 根据 SCARA 机器人的三维模型设计了二维工程图，并根据设计图加工机械部件，购置标准件，完成机器人本体的装配和调试。

(6) 根据机器人对传感器的要求，选择精度高、速度快、体积小的 GXL-8FB 型电感式接近开关和伺服电机自带的增量型编码器作为 SCARA 机器人的传感装置。

第三章 SCARA 机器人控制器的硬件设计

3.1 开放式机器人控制器的总体结构

工控机 (Industry Personal Computer, 简称 IPC) 具有强大的实时计算和数据处理能力, 具备丰富的软件资源, 可满足机器人轨迹规划和运动学、动力学求解在运算速度上的要求。且基于标准总线结构, 开放性好, 可扩展性强, 人机界面友好, 同时还具有良好的防尘和抗干扰能力, 可稳定运行于工业生产环境^{[56]-[58]}。因此, 我们选用工控机作为开放式机器人控制器的硬件平台, 并以 Windows2000 操作系统作为软件平台。Windows2000 是一个多任务操作系统, 实时性不高, 不能满足机器人的实时运动控制要求。而单片机具有很好的实时性, 且运行速度快, 稳定性好, 成本很低^{[59][60]}, 因此我们选用 STC89C51 单片机设计运动控制器, 以实现对机器人的四关节伺服电机的实时、独立控制。

图 3.1 为 SCARA 机器人控制器的结构框图。我们采用二级计算机体系结构设计开放

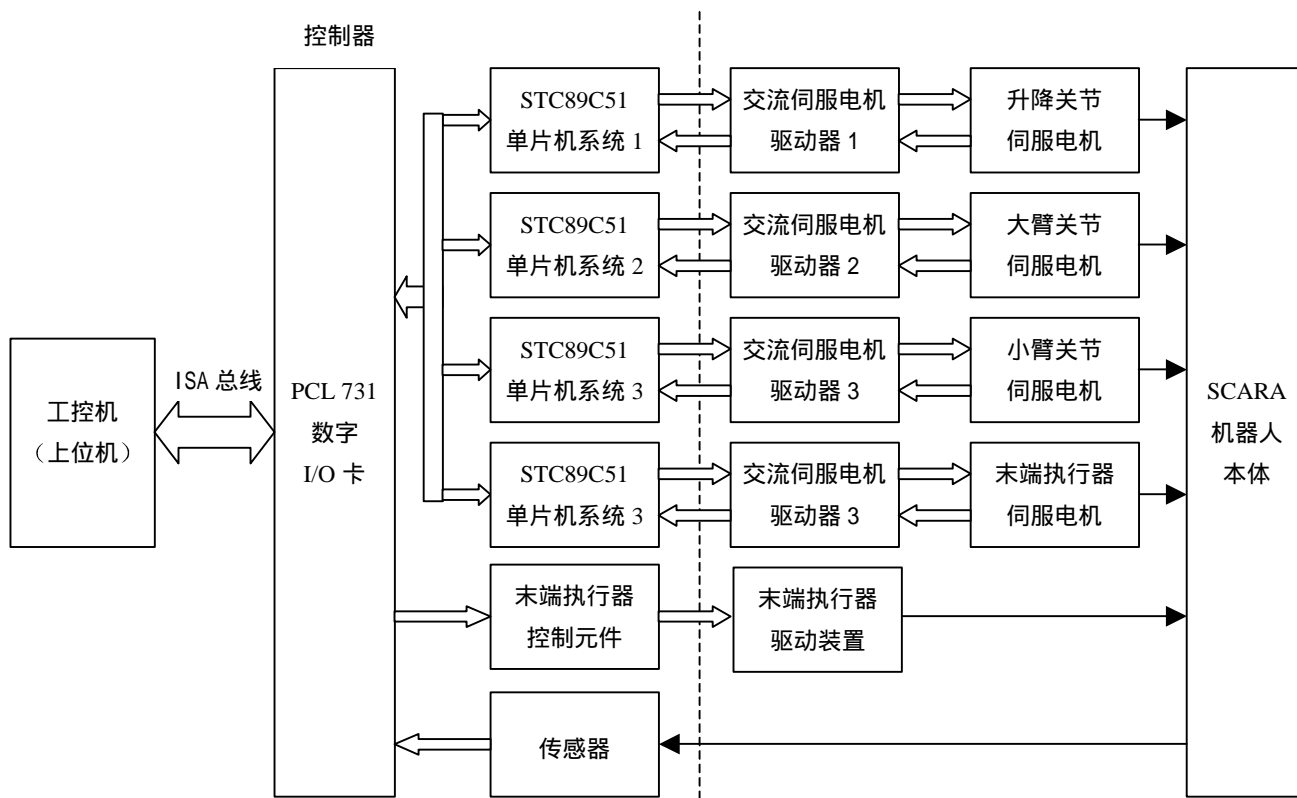


图 3.1 SCARA 机器人控制器结构框图

Fig. 3.1 Block diagram of SCARA robot's controller structure

式机器人控制器主体。其中，以工控机作为上位机，实现人机界面控制、轨迹规划、运动控制和状态监控等功能，其运动控制功能的实现是以 PCL-731 数字 I/O 卡作为通讯接口，向下位机和末端执行器控制元件发出关节运动指令及信号；下位机由四个 STC89C51 单片机系统组成，分别对机器人的四个关节运动进行独立控制，当某一单片机系统接收到上位机的控制指令，就会向其控制的伺服电机驱动器发出控制信号，以控制伺服电机的运行和停止，从而实现机器人的关节运动。为了对各关节运动进行精确控制，控制系统通过传感器和编码器获取关节运动反馈。伺服电机自带增量型编码器，当电机运转时，编码器会产生脉冲串行数据输出至伺服电机驱动器，电机驱动器接收到该信号后，将其分频转换为脉冲信号输出至 STC89C51 单片机系统，以实现关节运动的反馈。同时，机器人的各关节接近传感器时，传感器会产生感应信号，工控机通过 PCL-731 数字 I/O 卡输入该信号，即可获取机器人关节的位置信息。

3.2 SCARA 机器人上位机控制器

工控机采用 EVOC FSC-1713VNA 工业级 CPU 卡，CPU 为 Intel Pentium 4 2.4GHz，内存 512MB，硬盘 40GB，可以很好的满足机器人轨迹规划、位姿求解等功能对运算速度和数据存储能力的要求。工控机具备 RS232 串行口，可实现串口通讯及对下位机进行程序下载。底板带有多个 ISA 和 PCI 扩展槽，以便于系统功能扩展和外接通讯设备。

3.2.1 PCL-731 数字 I/O 卡

PCL-731 是研华公司生产的 48 位数字 I/O 卡，它提供 48 位并行数字输入/输出和 8255 PPI (programmable peripheral interface, 程序外部接口) 仿真模式，其输入输出都带缓冲，具有较强的驱动能力，同时，PCL-731 还具有较高的传输速度，可以满足控制器的上位机和下位机的实时、快速、多通道通讯要求^[61]，因此我们选用 PCL-731 作为工控机和单片机的通讯接口及传感器信号的输入接口。

PCL-731 的 48 位被分为 6 个 8 位的 I/O 口：A0、B0、C0、A1、B1 和 C1，它们通过两个 50 针的兼容 OPTO-22 的连接座与外部设备通讯，通过软件设置模式寄存器的数值可以将每个 I/O 口设置为输入或是输出。表 3.1 列出了 PCL-731 的 I/O 口地址，其中，6 个 I/O 口为通用数字输入/输出端口，其地址分别为 BASE+0~BASE+2 和 BASE+4~BASE+6；还有 2 个 I/O 口是模式寄存器，用于设置通用 I/O 口的工作模式，其地址分别为 BASE+3 和 BASE+7。BASE 为 PCL-731 的基地址，出厂默认值为 300H。通过 I/O 卡上的 8 位 SW1 开关可以对基地址进行重新设置^[61]。

表 3.1 PCL-731 的 I/O 端口分配表

Table 3.1 I/O ports assignment tables of PCL-731

地址	写	读
BASE+0	8255 A0 端口	8255 A0 端口
BASE+1	8255 B0 端口	8255 B0 端口
BASE+2	8255 C0 端口	8255 C0 端口
BASE+3	8255 模式寄存器 1 (用于 A0、B0 和 C0 端口)	N/A
BASE+4	8255 A1 端口	8255 A1 端口
BASE+5	8255 B1 端口	8255 B1 端口
BASE+6	8255 C1 端口	8255 C1 端口
BASE+7	8255 模式寄存器 2 (用于 A1、B1 和 C1 端口)	N/A

注：BASE 为 PCL-731 的基地址。

表 3.2 列出了 PCL-731 的 8255 模式寄存器 1 的数据格式，该模式寄存器的第 4、1、3、0 位分别用于设置 A0 口、B0 口、C0 口低四位(PC03-PC00)和 C0 口高四位(PC07-PC04)的读写模式，值为 1 表示端口为输入，为 0 表示端口为输出，其他位设定为指定值。PCL-731 还提供了两条硬件中断线，分别是 PC00 和 PC10，用以提供硬件中断。

表 3.2 8255 模式寄存器 1 (用于 A0、B0 和 C0 端口)

Table 3.2 8255 mode registers 1(Used to A0, B0 and C0 ports)

位	7	6	5	4	3	2	1	0
值	1	0	0	PA0	PC0H	0	PB0	PC0L

我们对 PCL-731 的 I/O 口作如下分配：A0、B0、C0 口和 B1 口的低四位用作工控机与单片机系统进行数据通讯的数据和控制端口，其中 A0 口用于传送工控机发送给单片机的数据，B0 口用于传送单片机发送给工控机的数据，C0 口用于控制各单片机与数据总线的通断状态，B1 口的低四位分别用于传送四个单片机系统的总线请求信号；A1 口用于输入传感器信号，C1 口的第 0 位用于控制末端执行器动作。B1 口的高 4 位及 C1 口的高 7 位留作扩展。

3.2.2 接口电路板

PCL-731 提供了两个兼容 OPT0-22 的 50 引脚的连接器，分别是 CN1 和 CN2，每个连接器上都有 3 个 I/O 口。但与单片机系统通讯只使用其中的部分 I/O 口。因此，我们设计了一块接口电路板，对 PCL-731 的 I/O 口的连接进行转换，同时用于输入传感器信号

及输出末端执行器控制信号。设计的接口电路板的原理图和实物图如图 3.2 和 3.3 所示。

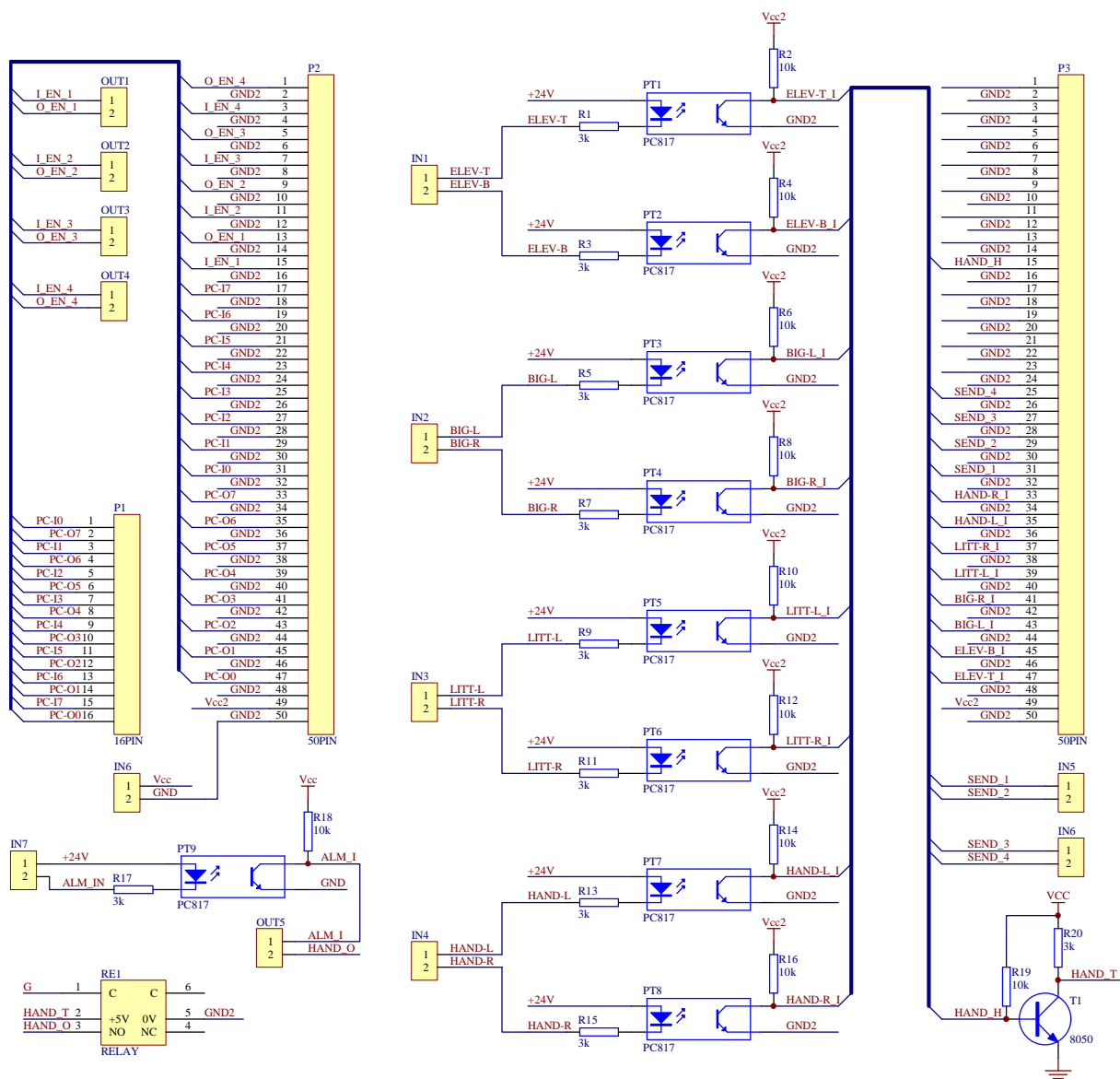


图 3.2 上位机接口电路板原理图

Fig. 3.2 Schematic diagram of main computer's interface circuit board

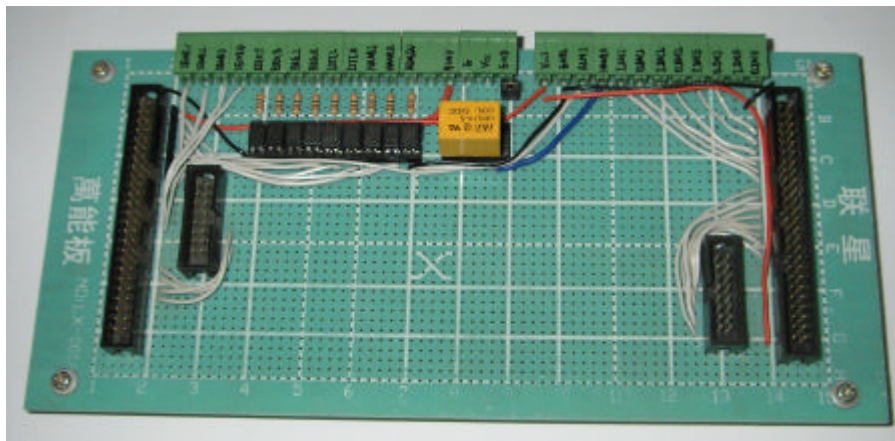


图 3.3 上位机接口电路板

Fig. 3.3 Interface circuit board of main computer

3.3 伺服电机驱动器的输入和输出信号

Σ II 系列伺服电机驱动器提供了输入输出信号用连接器 CN1，用于连接上级装置和外部电路，实现上级装置对电机的运行控制。伺服驱动器的输入信号有：位置指令、速度指令、扭矩指令和通用输入信号；输出信号有：编码器输出信号、警报信号和其他输出信号。输入信号和输出信号如图 3.4 所示^[47]，左边为输入信号，右边为输出信号。

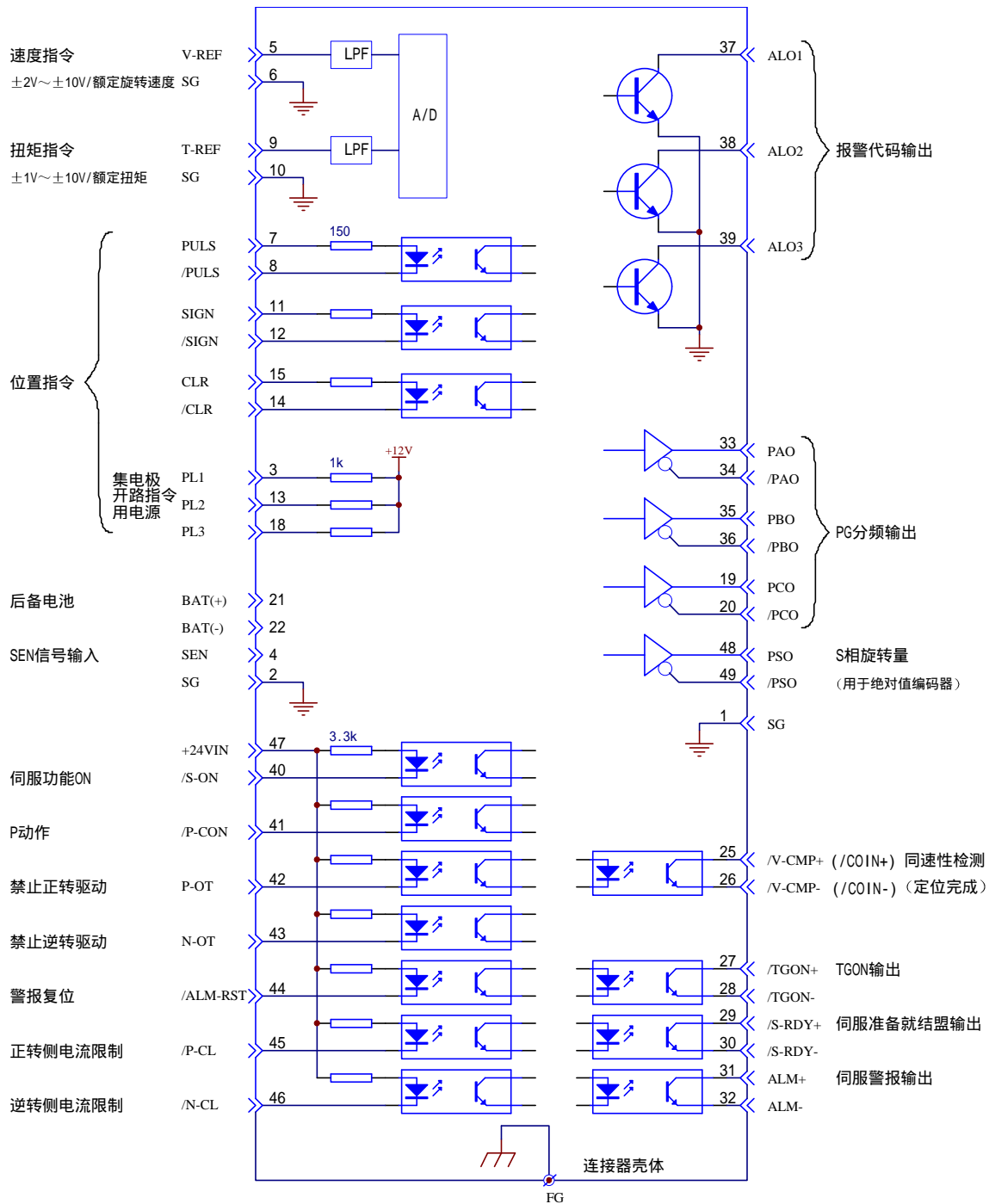


图 3.4 伺服电机驱动器的输入与输出信号

Fig. 3.4 Input and output sign of servo motor driver

3.3.1 输入信号

指令信号

伺服电机驱动器有三种控制模式：位置控制模式、速度控制模式和扭矩控制模式，在这三种控制模式下，分别通过位置指令、速度指令和扭矩指令控制电机的运行，三种指令可以结合使用。

位置指令。位置指令包括指令脉冲输入、指令符号输入和清除输入，通过在 PULS 和 /PULS 之间输入指令脉冲，可以发出移动指令，使电机运行。在 SIGN 和 /SIGN 之间输入指令符号，可以控制电机的运行方向。在 CLR 和 /CLR 之间输入清除信号，用于将伺服驱动器的“偏移计数器”设定为“0”。当使用集电极开路的位置指令输入电路时，可以使用伺服单元内置的 12V 电源 PL1~PL3，也可以使用外部电源。

速度指令。当为速度控制（模拟指令）时，在 V-REF 和 SG（6）之间输入 $\pm 2V \sim \pm 10V$ 范围内的电压，就可以控制电机按与输入电压成比例的速度运行。

扭矩指令。与速度指令的使用相似，当为扭矩控制时，在 T-REF 和 SG（10）之间输入 $\pm 1V \sim \pm 10V$ 范围内的电压，就可以控制电机按与输入电压成比例的速度运行。

我们选用位置控制模式对伺服电机驱动器进行控制，自备 5V 电源，因此在控制中使用了位置指令的 6 个输入信号，即 PULS、/PULS、SIGN、/SIGN、CLR 和 /CLR。

通用输入信号

通用输入信号包括：顺序输入信号和绝对值编码器用输入信号。其中，BAT（+）、BAT（-）、SEN 和 SG（2）为绝对值编码器用输入信号，在使用绝对值编码器时连接。顺序输入信号有：+24VIN、/S-ON、/P-CON、P-OT、N-OT、/ALM-RST、/P-CL 和 /N-CL，在对伺服电机驱动器的控制中，我们使用了+24VIN、/S-ON、P-OT 和 N-OT 四个信号，其功能简要说明如下：

+24VIN。顺序输入信号用的外部电源输入，用于给顺序信号提供控制电源。

/S-ON（伺服 ON）。伺服开机输入信号，用于切换电机的通电状态和非通电状态，当 /S-ON 为 ON 的时候，为伺服 ON 状态，这时电机通电，处于通常的运行状态。当 /S-ON 为 OFF 的时候，为伺服 OFF 状态，这时电机处于非通电状态，不能运行。

P-OT 和 N-OT。禁止正转驱动和禁止反转驱动，一般用于超程防止，即当机械的可动部分超出可移动范围时，停止电机的驱动。这两个信号都是 OFF（高电平）有效。

3.3.2 输出信号

编码器输出信号

PAO 和/PAO、PBO 和/PBO。是编码器的 A 相和 B 相信号，它们是编码器脉冲经伺服电机驱动器分频后输出的 2 相脉冲信号，通过对脉冲信号进行计数，可以检测电机的旋转量，比较 A 相信号与 B 相信号的位相形态则可以判断电机的旋转方向。

PCO 和/PCO。是编码器的原点脉冲信号，当有脉冲产生时，表示正经过编码器的原点位置。

PSO 和/PSO。S 相信号，在绝对值编码器的情况下，用于输出旋转量的串行数据。

编码器输出信号都是差分信号，可以使用 SN75175 芯片将其转换为 TTL 电平信号。

警报信号

ALM+和 ALM-。伺服警报信号，正常情况下 ALM+和 ALM-之间为“关”状态。当伺服电机驱动器检测出现异常时，ALM+和 ALM-之间为“开”状态。

ALO1~AOL3。警报编码信号，用于输出表示伺服驱动器检测出来的警报种类的警报编码。SG(1)为警报编码输出和编码器输出的信号接地。

其他输出信号

其他输出信号有：/V-CMP+和/V-CMP-、/COIN+和/COIN-、/TGON+和/TGON-及/S-RDY+和/S-RDY-，分别是同速输出信号、定位结束信号、电机旋转检测输出信号和伺服准备就绪输出信号。

我们使用了以下输出信号：编码器输出的 A 相、B 相和 C 相信号及 ALM+和 ALM-。

3.4 SCARA 机器人下位机控制器

基于模块化设计的思想，我们采用 4 个功能相同的 STC89C51 单片机系统组成开放式机器人控制器的下位机系统，以实现对机器人各关节电机的实时、独立控制。以下先对 STC89C51 单片机作简单介绍。

3.4.1 STC89C51 简介

STC89C51 是宏晶公司推出的 STC89 系列单片机中的一款产品，功能和指令系统与 Intel 的 MCS-51 系列单片机兼容。该单片机内带 4K Flash Memory(电擦写闪速存储器)，512 字节 RAM，2K E²PROM，2 个 16 位定时器，4 个 8 位 I/O 口，1 个串行口。内置看门狗，提高了系统的稳定性。支持高达 80MHz 的外部时钟频率，且支持双倍速，即每个机器周期为 6 个时钟，因此在相同的外部时钟频率下，可获得比传统的 8051 单片

机快一倍的速度。该单片机还支持 ISP, 通过串口和 RS-232 电平转换器即可对内部 Flash 存储器进行在线程序下载, 无需编程器或外加电路, 擦写次数可达 100, 000 次以上^[58]。单片机较快的运行速度和很好的稳定性满足了机器人的关节运动控制要求。

3.4.2 STC89C51 单片机系统硬件设计

单片机系统应具有与上位机通讯的功能, 以接收上位机的指令, 并反馈状态信息。同时还应具有电机运动控制的功能, 并能读取电机编码器的脉冲数据和伺服驱动器的警报信号, 从而实现对机器人各关节运动的精确控制。为实现功能要求, 我们设计了 STC89C51 单片机系统, 其结构框图和接线图如图 3.5、3.6 所示。我们对单片机的 I/O

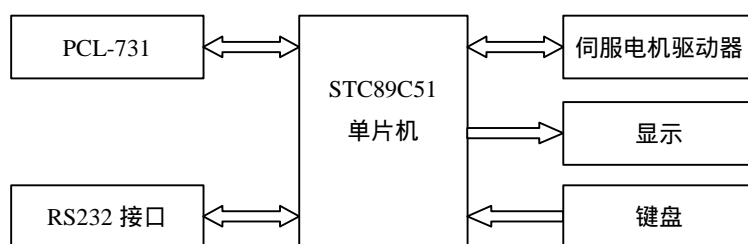


图 3.5 STC89C51 单片机系统结构框图

Fig. 3.5 Structure block of STC89C51 system

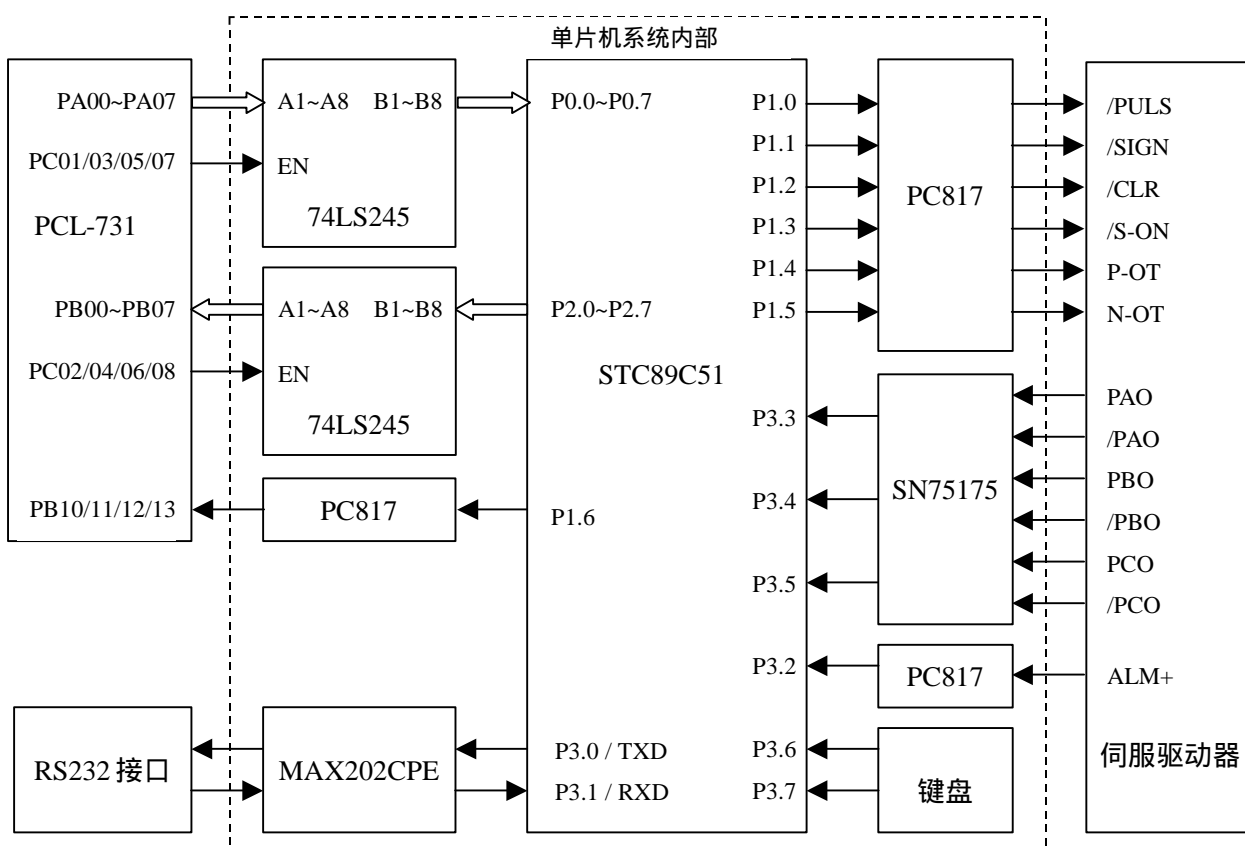


图 3.6 STC89C51 单片机系统接线图

Fig. 3.6 Connection diagram of STC89C51 system

口作如下功能分配。

(1) P0 和 P2 单片机与工控机数据通讯。通过 74LS245 分别与 PCL-731 的 A0 和 B0 口相连, 分别用于传送 PCL-731 输入至单片机的信号和单片机输出至 PCL-731 的信号。

(2) P1.0~P1.5 电机运动控制。经 PC817 光耦隔离连接至伺服驱动器的/PULS、/SIGN、/CLR、/S-ON、P-OT 和 N-OT, 用于控制电机运动。

(3) P1.6 数据发送请求。4 个单片机系统的 P1.6 经光耦隔离分别连接至 PCL-731 的 PB10~PB13, 用于单片机需要向工控机传送数据时发出总线请求信号。

(4) P3.0 和 P3.1 串行通讯 (TXD 和 RXD)。通过 MAX202CPE 电平转换器与 RS232 接口相连, 实现串行通讯和程序下载功能。

(5) P3.2 伺服警报输入。用于输入伺服驱动器的警报信号。4 个伺服驱动器的警报信号串联后经光耦隔离, 与 P3.2 相连。

(6) P3.3~P3.5 编码器信号输入。电机编码器的三相 (A 相、B 相和 C 相) 脉冲信号经 SN75175 转换, 与 P3.3~P3.5 相连接, 用于输入编码器的脉冲信号。

(7) P3.6~P3.7 键盘输入。

(8) P1.7 扩展部分。预留 1 路光耦输出以备将来使用。

图 3.7 和 3.8 分别是我们设计的 STC89C51 单片机系统实物图及原理图。

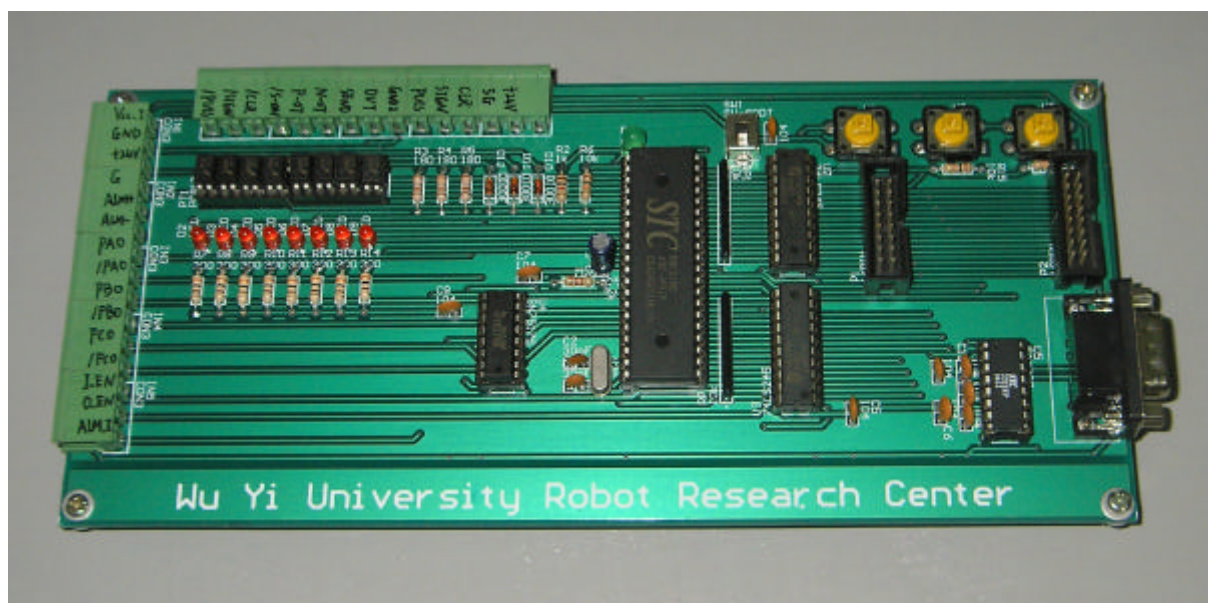


图 3.7 STC89C51 单片机系统电路板

Fig. 3.7 Circuit board of STC89C51 single chip system

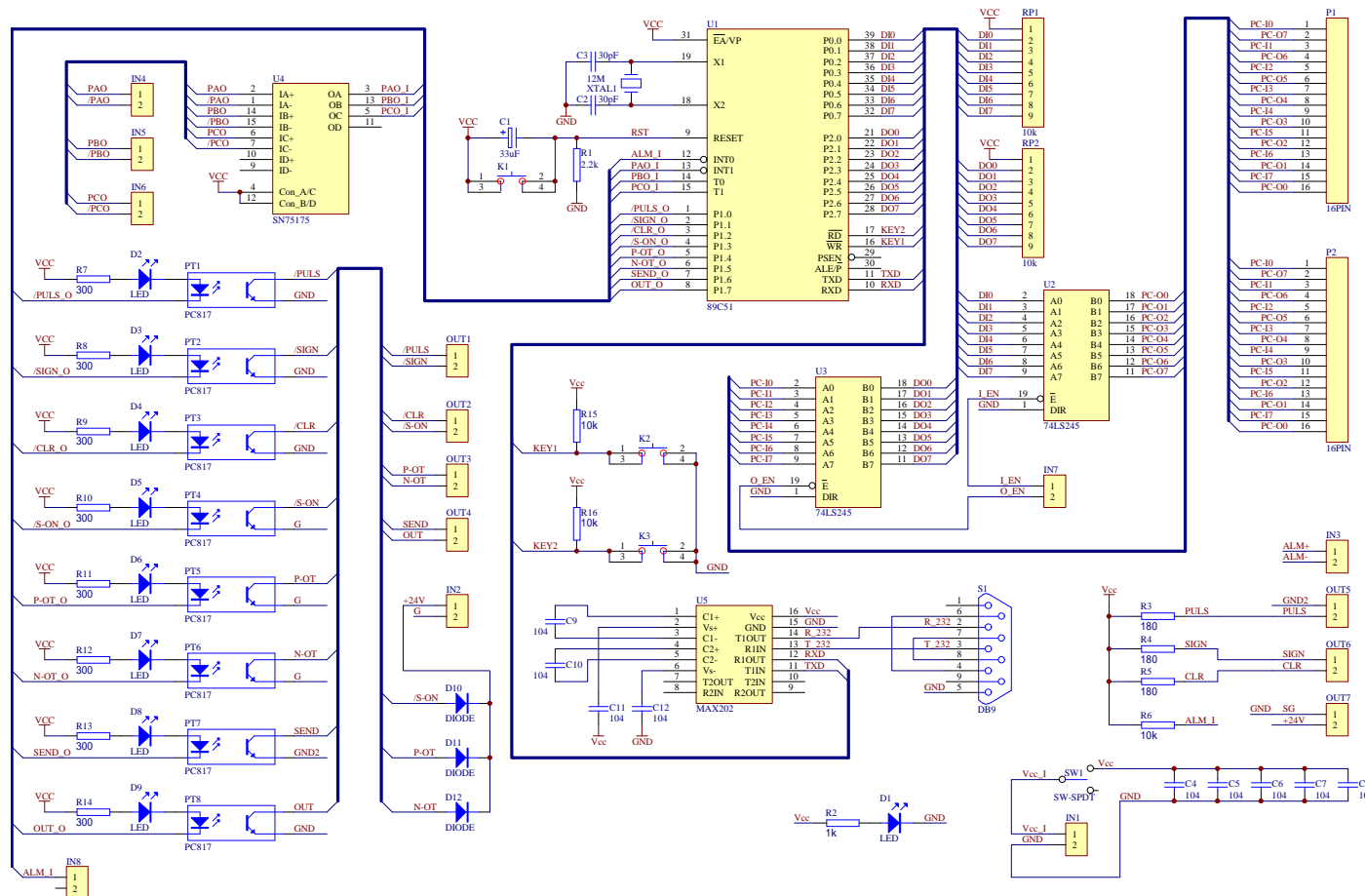


图 3.8 STC89C51 单片机系统原理图

Fig. 3.8 Schematic diagram of STC89C51 single chip system

3.5 控制系统的硬件安装与配线

为便于配线，减少安装空间，我们将下位机控制器、接口电路板、伺服驱动器及其主电路配线所需元器件都安装在控制柜安装板上，并在安装板四周和中间布置线槽。控制柜安装板布局如图 3.9 所示。

对于控制系统的硬件部分，进行以下配线和调试。

(1) 伺服驱动器的主电路配线^[50]。将伺服驱动器的主电路电源输入端子和控制电源输入端子分别与接触器和漏电开关的端子相连接，根据主电路配线图完成漏电开关、接触器、继电器、ON/OFF 开关、警报灯及+24V 电源之间的配线。

(2) 伺服驱动器与单片机控制电路板之间的配线。通过通讯线缆，将伺服驱动器 1~4 的 CN1 分别与控制电路板 1~4 的输入输出端子相连接，并将伺服驱动器的警报信号串联。

(3) 伺服电机与驱动器之间的配线。将电机的电源电缆与伺服驱动器的电机连接端相连，将电机的编码器电缆与伺服驱动器的 CN2 相连。

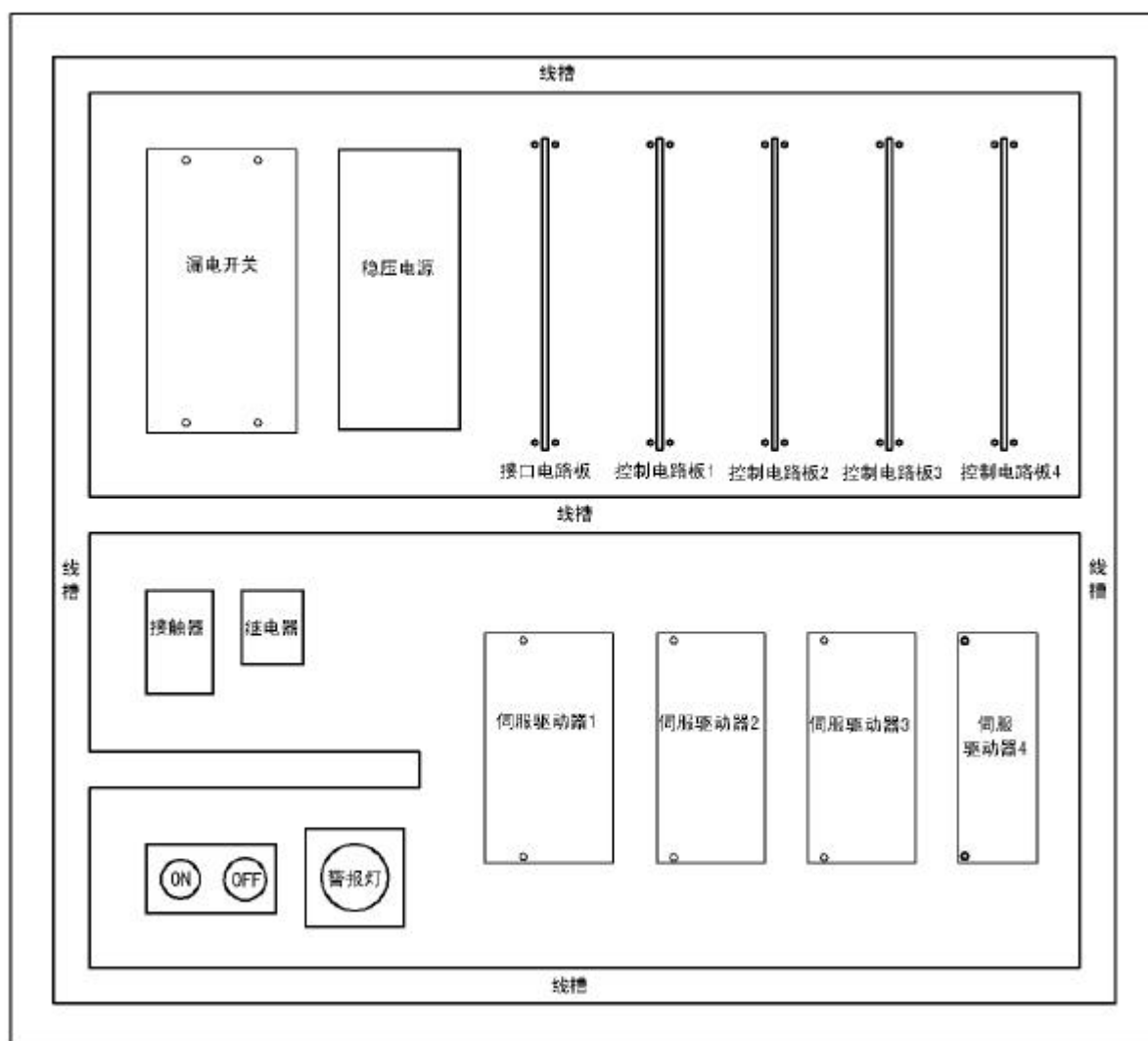


图 3.9 控制柜安装板布局图

Fig. 3.9 Layout of control cabinet's board

- (4) 电源配线。将三相 220V 变压器的电源输出端与漏电开关的输入端相连。
- (5) 伺服电机及驱动器调试。确认正确完成以上配线的情况下，打开电源，并按下 ON 开关，使伺服驱动器主电路通电。通过伺服驱动器的控制面板对电机进行试运行。如果正常，则继续，如果出现异常，则先检查配线是否正确，如果配线正确，则检查电机或驱动器是否出现故障。
- (6) 单片机控制电路板电源配线。将单片机控制电路板的+5V、+24V 电源输入端分别连接至稳压电源的+5V 和+24V 输出端。
- (7) 单片机控制电路板与工控机之间的配线。将 PCL-731 卡安装在工控机底板的 ISA 插槽上，并通过两根 50 线的排线将其 CN1 和 CN2 接口与接口电路板相连，然后再通过多根 16 线的排线将接口电路板的 P1 接口和 4 个单片机控制电路板的 P1、P2 接口相连。

图 3.10 为安装完成的控制柜安装板实物图。图中，电路板垂直于安装板安装，可以减少安装空间，从而减少安装板的体积。经测试，控制器配线正确，可以正常工作。



图 3.10 控制柜安装板

Fig. 3.10 Installing board of control cabinet

3.6 本章小结

本章主要阐述了机器人控制器的硬件系统设计，具体内容如下：

(1) 设计了开放式机器人控制器的总体结构，选择以工控机作为上位机，实现人机界面、轨迹规划、运动控制和状态监控等功能，下位机由四个 STC89C51 单片机系统组成，分别对机器人的四个关节运动进行独立控制。

(2) 选用 PCL-731 I/O 卡作为上位机与下位机的通讯接口，对该卡的 I/O 口进行了分配。

(3) 设计了 STC89C51 单片机系统，该系统具有与上位机通讯、运动控制、键盘、显示和串行通讯等功能。根据功能要求设计了硬件电路，并制作了电路板。

(4) 完成了控制器硬件系统的安装、配线和调试。

第四章 SCARA 机器人控制器的软件设计

4.1 SCARA 机器人控制器软件系统的结构和功能

我们采用 Borland 公司的 C++ Builder 开发 SCARA 机器人控制器的上位机软件系统。该系统运行于 Windows 2000 平台，由人机界面、轨迹规划、运动控制、I/O 通讯、状态监控、参数设置和数据存储等功能模块组成。下位机软件系统采用汇编语言开发，包括键盘扫描、按键处理、电机控制、I/O 通讯、串行通讯和编码器脉冲检测等功能模块。

图 4.1 为 SCARA 机器人控制器的软件系统结构框图。

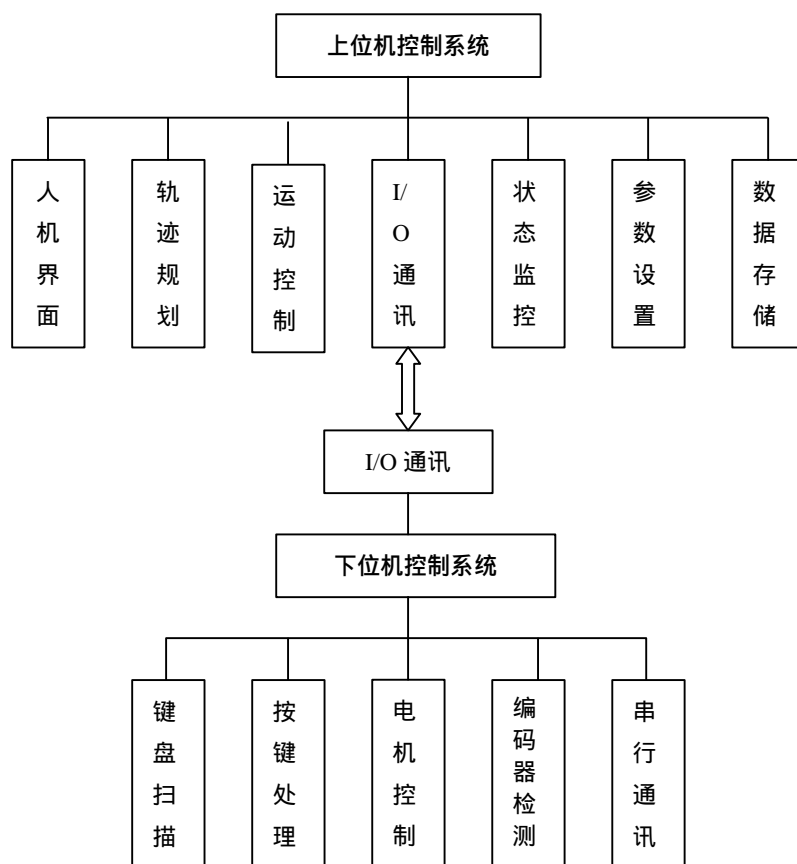


图 4.1 SCARA 机器人控制器软件系统结构框图

Fig. 4.1 Structure Diagram of the software system SCARA robot's controller

以下对上位机和下位机软件系统各模块的功能作简要说明。

4.1.1 上位机软件系统的功能

(1) 人机界面。上位机软件系统提供了友好的用户界面，用户通过该界面可以对机器人进行灵活的控制。

(2) 轨迹规划。根据给定的路径结点和轨迹插值方式对机器人末端执行器的运动

轨迹进行求解。

(3) 运动控制。将各关节的运动量发送到下位机控制系统，并发出控制指令，控制各关节运动。

(4) I/O 通讯。实现上位机和下位机的通讯，以传送上位机发送给下位机的控制指令和数据以及下位机反馈给上位机的状态信息。

(5) 状态监控。用于检测机器人各传感器的反馈信号和伺服警报信号，检测的信号通过人机界面显示。

(6) 参数设置。用于对机器人参数、I/O 卡类型等参数进行设置。

(7) 数据存储。用于存储各关节运动数据及机器人和系统参数。

4.1.2 下位机软件系统的功能

(1) 电机控制。根据控制指令，通过伺服驱动器控制电机的通断电、正转、反转和停止。

(2) I/O 通讯。用于实现上位机和下位机的通讯。

(3) 键盘扫描。用于扫描是否有键按下。

(4) 按键处理。根据键盘扫描的结果执行功能动作。

(5) 编码器脉冲检测。用于检测电机的实际旋转量。

(6) 串行通讯。用于与其他单片机系统、上位机或其他具有串行通讯功能的其他进行通讯，实现功能扩展和网络控制。

4.2 SCARA 机器人数学建模

4.2.1 SCARA 机器人几何建模

从机构学的角度来分析，SCARA 机器人的机械本体是一个由移动关节和转动关节串联起来的开链式连杆系统，关节的相对移动和转动形成连杆的运动，从而实现机器人的运动。为了实现对机器人的运动控制，首先应分析各连杆之间的运动关系。Denavit 和 Hartenberg 于 1955 年提出了一种在每个连杆的关节上建立坐标系的矩阵方法，即 D-H 方法，该方法已成为机器人表示和建模的标准方法^[11]。

我们采用 D-H 方法建立了 SCARA 机器人的坐标系，如图 4.2 所示。其中，坐标系 0 为基座的坐标系，坐标系 i ($i=1,2,3,4$) 为关节 i 的坐标系。表 4.1 为根据 D-H 方法确定的 SCARA 机器人连杆的 D-H 参数。

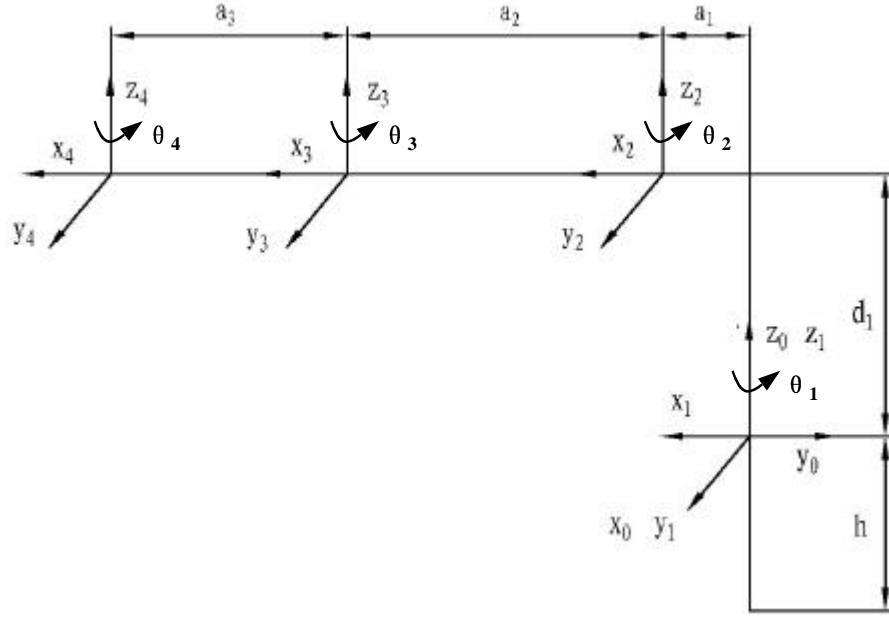


图 4.2 SCARA 机器人的坐标系

Fig. 4.2 The coordinate system of SCARA robot

表 4.1 SCARA 机器人的 D-H 参数表

Table 4.1 D-H parameter table of SCARA robot

连杆 i	θ_i	d_i	α_{i-1}	a_{i-1}	变量	变量范围
1	-90°	d_1	0°	0	D_1	0~500
2	θ_2	0	0°	120	θ_2	$-95^\circ \sim 95^\circ$
3	θ_3	0	0°	400	θ_3	$-190^\circ \sim 190^\circ$
4	θ_4	0	0°	300	θ_4	$-270^\circ \sim 270^\circ$

4.2.2 SCARA 机器人正向运动学求解

采用坐标变换的方法，通过两个旋转和两个平移变换，可以将关节 $i-1$ 的坐标系转换到关节 i 的坐标系上。我们用 aT_b 表示坐标系 b 相对于坐标系 a 的变换矩阵，用 $\text{Rot}(t, \beta)$ 表示旋转变换的齐次矩阵，用 $\text{Trans}(a, b, c)$ 表示移动的齐次矩阵，其中 t 为旋转轴， β 为转动角， a, b, c 分别为沿 x, y, z 轴移动的距离。则关节 $i-1$ 到关节 i 的坐标系的变换可以通过以下变换矩阵表示^{[10][11]}：

$$\begin{aligned}
 {}^{i-1}T_i &= \text{Rot}(z_i, q_i) \text{Trans}(0, 0, d_i) \text{Trans}(a_{i-1}, 0, 0) \text{Rot}(x_i, a_{i-1}) \\
 &= \begin{bmatrix} c q_i & -s q_i & 0 & 0 \\ s q_i & c q_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c a_{i-1} & -s a_{i-1} & 0 \\ 0 & s a_{i-1} & c a_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

$$= \begin{bmatrix} cq_i & -sq_i ca_{i-1} & sq_i sa_{i-1} & a_{i-1} cq_i \\ sq_i & cq_i ca_{i-1} & -cq_i sa_{i-1} & a_{i-1} sq_i \\ 0 & sa_{i-1} & ca_{i-1} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中, sq 和 cq 分别是 $\sin q$ 和 $\cos q$ 的缩写。

由该公式及 SCARA 机器人的 D-H 参数可得,

$${}^0T_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^1T_2 = \begin{bmatrix} cq_2 & -sq_2 & 0 & 120cq_2 \\ sq_2 & cq_2 & 0 & 120sq_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$${}^2T_3 = \begin{bmatrix} cq_3 & -sq_3 & 0 & 400cq_3 \\ sq_3 & cq_3 & 0 & 400sq_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad {}^3T_4 = \begin{bmatrix} cq_4 & -sq_4 & 0 & 300cq_4 \\ sq_4 & cq_4 & 0 & 300sq_4 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

将以上各变换矩阵相乘, 可得末端执行器的坐标系 (即坐标系 4) 与基座的坐标系之间的变换矩阵 0T_4 :

$$\begin{aligned} {}^0T_4 &= {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 \\ &= \begin{bmatrix} s(q_2 + q_3 + q_4) & c(q_2 + q_3 + q_4) & 0 & 300s(q_2 + q_3 + q_4) + 400s(q_2 + q_3) + 120sq_2 \\ -c(q_2 + q_3 + q_4) & s(q_2 + q_3 + q_4) & 0 & -300c(q_2 + q_3 + q_4) - 400c(q_2 + q_3) - 120cq_2 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

4.3 上位机控制器的软件设计

4.3.1 人机界面设计

C++ Builder 是一款面向对象的可视化快速应用程序开发工具, 集成了先进的可视化组件库 VCL (Visual Component Library) 和优秀的编译器、调试器, 具有强大的数据库开发和支持能力。采用该系统开发的软件具有良好的人机界面和可移植性^{[63][64]}。我们采用 C++ Builder 开发上位机软件系统, 系统提供了轨迹规划、运动控制、I/O 卡通讯和参数设置等用户界面。图 4.3 为轨迹规划模块的用户界面, 该界面用于显示机器人末端执行器的运动轨迹、运行速度和位置信息。

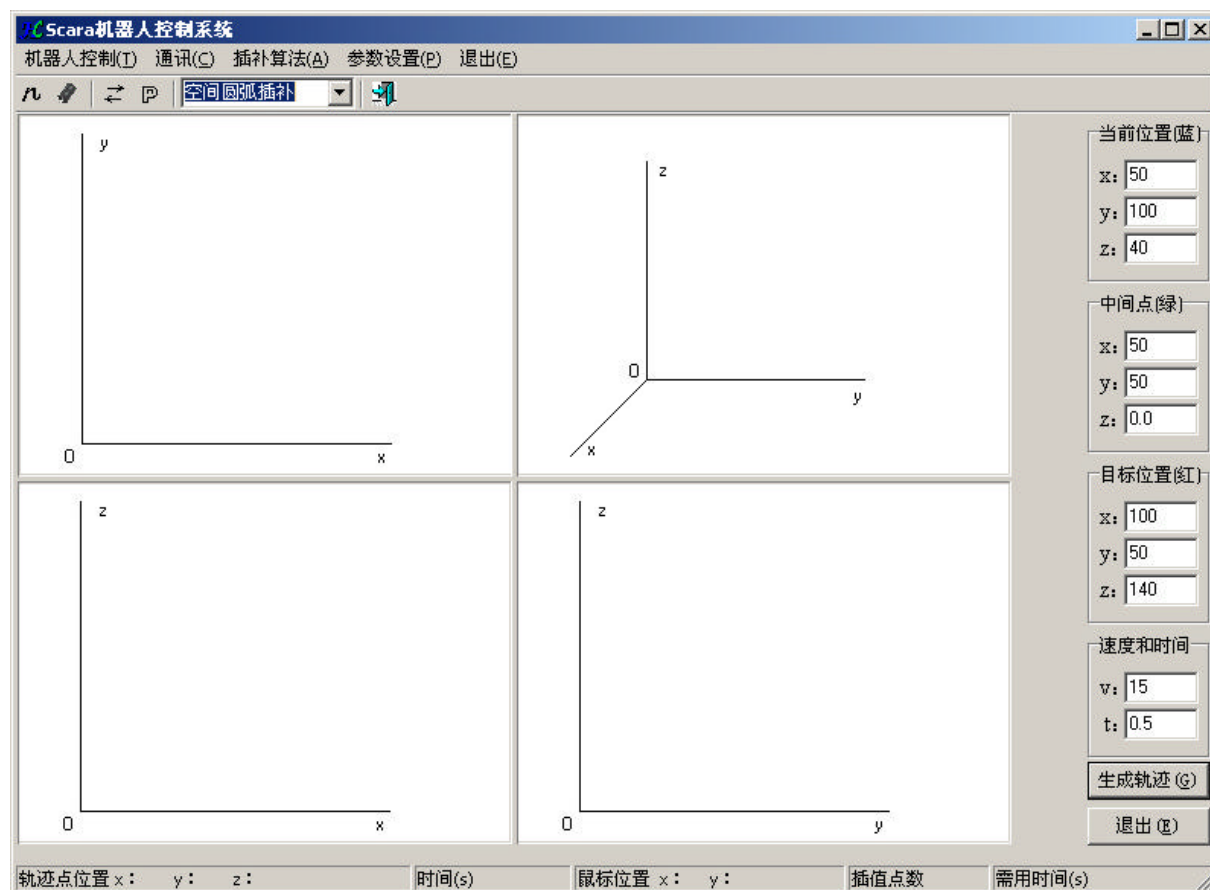


图 4.3 SCARA 机器人轨迹规划模块人机界面

Fig. 4.3 Human interface of SCARA robot's track layout module

4.3.2 轨迹规划

轨迹规划模块提供了平面直线插补、空间直线插补、平面圆弧插补和空间圆弧插补等四种插补算法。在图 4.2 所示的轨迹规划模块界面中输入目标位置和移动速度，并选择轨迹插补算法，按“生成轨迹”按钮，即可由系统的轨迹规划模块按设定的速度生成并显示末端执行器的运动轨迹。在轨迹生成过程中，以蓝色圆点显示当前运动位置，以黑色曲线显示已走过的轨迹。

4.3.3 关节的运动控制

根据系统的控制功能要求，上位机有以下关节运动控制指令：关节正转、关节反转、关节正转一定角度（或距离）、关节反转一定角度（或距离）、停止转动、速度设置、回零、伺服 ON（或 OFF）、禁止（或允许）关节正转、禁止（或允许）关节反转。其中，关节正转或反转一定转动量指令和回零指令不仅要给出控制指令，而且还要给定转动量数据。控制指令和数据由运动控制模块发出，指令和数据传送至下位机由通讯模块完成。表 4.2 列出了工控机对单片机的运动控制指令。

表 4.2 运动控制指令表

Table 4.2 Table of moving controlling instructions

指令字	功能	指令后传送的数据	指令字	功能	指令后传送的数据
10	关节正转		18	禁止关节反转	
11	关节反转		19	速度输入	速度
12	关节停止		1a	正转位置指令	位移
13	伺服ON		1b	反转位置指令	位移
14	伺服OFF		1c	与单片机通讯初始化	
15	允许关节正转		20	关节停止正转	
16	禁止关节正转		21	关节停止反转	
17	允许关节反转		22	读取关节状态	

注：指令字均为16进制代码。

图 4.4 为 SCARA 机器人的运动控制界面。该模块提供了关节选择、速度设置、运动



图 4.4 SCARA 机器人运动控制模块人机界面

Fig. 4.4 Human interface of SCARA robot's moving controlling

控制、位置控制、试验、其他控制、状态显示和当前位置显示等功能。通过“关节选择”设置当前操作的关节后，即可通过“运动控制”和“位置控制”功能控制该关节运动，并可对其速度进行设置。关节的状态和位置信息通过“状态”和“当前位置”显示。运动控制模块还提供了稳定性实验、点位运动实验和连续运动实验三种功能，通过点击“实

验”框中的“参数设置”按钮可以对实验的参数进行设置，在参数设置完成后，按下“开始”按钮即可开始实验。

对于关节的回零控制，我们采用如下方法：先使关节电机快速反转，寻找零点位置。当检测到零点位置时，就将关节电机速度设置为慢速继续反转一定距离，这段距离不应使关节运动超过极限位置。然后再使关节电机慢速正转寻找零点位置。当检测到零点位置时，立即给出电机停止信号，停止电机运转，从而实现关节的回零运动。图 4.5 为关节回零控制的流程图。

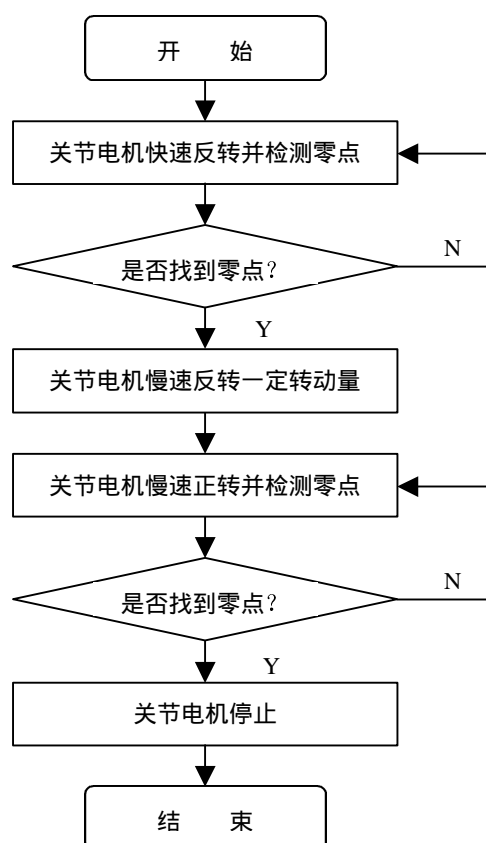


图 4.5 关节回零控制流程图

Fig. 4.5 Flow diagram of joint's returning zero controlling

4.3.4 状态监控

为防止机器人各关节运动超出允许范围而造成机械碰撞，我们在机器人本体上安装多个传感器。状态监控模块定时读取这些传感器信息，当某关节运动超出允许范围时，状态监控模块就会调用运动控制模块，控制该关节电机停止运动，从而实现超程防止功能。在回零过程中，状态监控模块通过检测传感器信息来确定是否回到零点。

状态监控模块还具有警报监测和警报处理功能。当伺服电机运行异常时，伺服驱动器会产生警报信号，下位机软件系统收到该警报信号，将其送至上位机软件系统，上位

机系统的状态监控模块检测到该信号后,就调用运动控制模块,向下位机系统发出电机停止指令,同时在用户界面上显示该警报用信息。

4.3.5 参数设置

图 4.6 为参数设置界面。“选择 I/O 卡”选项用于设置机器人控制用 I/O 卡。根据实际情况,对机器人电机旋转 1 圈的脉冲数和升降滚珠丝杠节距进行设置,系统会自动计算出各关节电机的脉冲当量,并存储在数据库中,作为计算各关节运行速度的参数。

图 4.6 SCARA 机器人参数设置界面

Fig. 4.6 Parameter setting interface of SCARA robot

4.4 下位机控制器的软件设计

4.4.1 下位机软件系统的工作流程

基于模块化设计的思想,我们针对下位机系统的各项功能编制了子程序,在主程序中通过循环调用各子程序模块实现其功能。图 4.7 为下位机系统的工作流程图。系统工作时,首先通过键盘扫描模块扫描是否有键按下,如果有键按下,就对相应按键的标志位进行置位,并进入按键处理模块,根据按键标志位进行功能操作。如果没有键按下,就进入指令扫描模块,检测是否有来自上位机系统的指令或数据。当成功接收到上位机的指令时,就对该指令对应的功能标志位置位,如果接收到上位机发送的数据,就对该数据进行校验解码。然后进入电机控制模块,根据接收到的指令和数据对电机的运动进行控制。最后返回主程序开始继续循环执行各子程序。

除了以上在主程序中执行的功能模块,电机运动控制、警报处理和串行通讯等其他

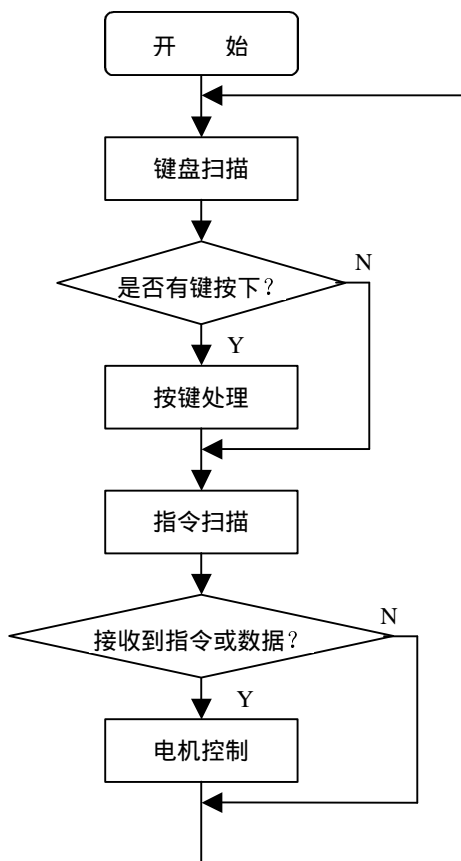


图 4.7 SCARA 机器人下位机软件系统流程图

Fig. 4.7 Flow diagram of the software system of SCARA robot's slave controller

三个功能模块通过中断来实现。

4.4.2 运动控制

我们采用位置控制模式对电机的运动进行控制。在这种控制模式下，通过输出脉冲至伺服电机驱动器的/PULS 端，即可驱动电机运转，电机的运转速度与脉冲频率成正比，转动量与脉冲数量成正比^[65]。为实现对电机运转速度和转动量的精确控制，我们采用定时中断方式输出脉冲，控制电机运动。将定时器 0 作为电机脉冲输出中断，当定时器 0 产生中断时，通过执行中断服务程序，产生 1 个脉冲输出至电机的/PULS 端，即可使电机转动一个脉冲当量的角度。通过设置定时器 0 的 TH0 和 TL0 值，可对中断间隔时间进行设置，从而实现电机的运转速度设置。在中断服务程序中，还对脉冲的数量进行计数，以实现电机的转动量控制。

标志位是记录系统运动过程中的各种状态的重要变量。我们在下位机软件系统中使用了多个标志位，记录按键、电机、警报等各种状态。对于电机的正转、反转和是否对脉冲计数，我们分别设置了 cw_f 、 ccw_f 和 p_count_f 标志位。当需要电机正转或反转时，只需将 cw_f 或 ccw_f 置为 1 即可。定时器 0 的中断服务程序执行时，通过判断 cw_f 或 ccw_f 是否为 1 来决定是否输出脉冲，如果 cw_f 和 ccw_f 其中有一个标志位为 1，则输出一个脉冲，如果两个标志位都不为 1，则不输出脉冲。输出脉冲之后，再判断 p_count_f 是否为 1，如果为 1，则对脉冲进行计数。图 4.8 为定时器 0 的中断服务程序的流程图。

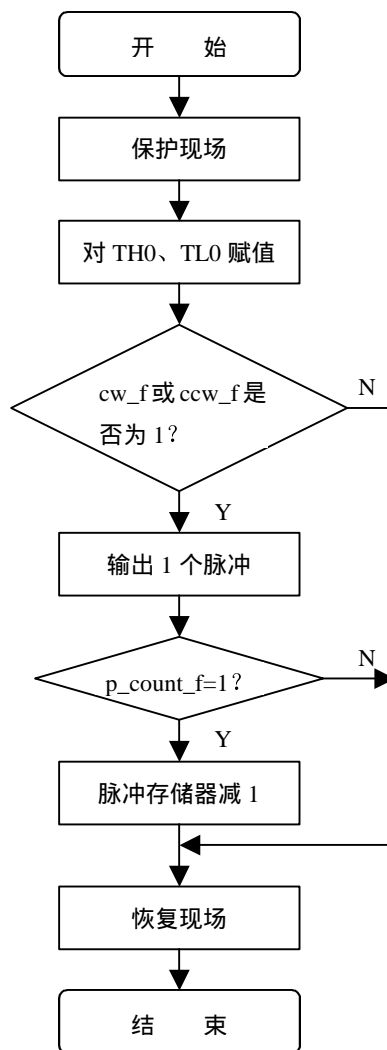


图 4.8 定时器 0 中断服务程序流程图

Fig. 4.8 Flow diagram of time 0's interrupt service program

在运动控制子程序中，根据电机的正转和反转标志位 cw_f 和 ccw_f ，对 $SIGN$ 的 ON/OFF 状态进行设置，以控制电机的转动方向。如果将 cw_f 和 ccw_f 都置为零，则可使电机停止运行。

4.4.3 警报处理

当电机运转出现异常时, 伺服驱动器会产生警报信号, 该信号输入至单片机的外部中断 0 端。单片机响应中断, 执行外部中断 0 服务程序, 对警报作以下处理: 首先输出电机停止信号, 停止电机运转, 然后向上位机发出总线请求信号, 在得到总线使用权的情况下, 将警报信号传送至上位机。

4.4.4 串行通讯

STC89C51 单片机内部有一个可编程全双工串行通讯接口, 通过该串行口, 单片机可以与上位机、其他单片机或具有 RS232 功能的装置进行串行通讯, 还可以通过 RS-422A 标准总线实现网络通讯^{[59][66]}。为便于系统功能扩展, 我们设计了串行通讯模块。

STC89C51 单片机的串行通讯有方式 0、方式 1、方式 2 和方式 3 等四种工作方式。在方式 0 下, 串行口的 SBUF 是作为同步移位寄存器使用的, 主要用于扩展并行 I/O 口, 方式 1、方式 2 和方式 3 均可用于异步通讯, 但它们的字符帧格式和通信波特率不同, 其中, 方式 2 的波特率由单片机主频经 32 或 64 分频后提供, 因此波特率选取范围受限。方式 1 和方式 3 的波特率由定时器 T1 控制, 可以在 55 至 19200 内的多个波特率中选择^{[59][67]}。

我们采用方式 1 工作, SCON 赋值为 01010000b。在这种工作方式下, 每个字符帧有 10 位, 包括 1 位起始位、8 位数据位和 1 位停止位。定时器 1 设置在方式 2 下工作, TH1 和 TL1 均赋初值为 0xFDH, 因此波特率设定为 9600。

串行通讯模块由数据发送和数据接收模块组成。我们采用查询方式设计数据发送子程序, 图 4.9 为该子程序的工作流程图。发送数据时, 首先关闭串行口中断, 并将 TI 置为 0, 然后将要发送的数据送到 SBUF, 接下来检测 TI 是否为 1。当 TI 由硬件置为 1 时, 表示发送完成, 这时将 TI 清零, 然后开串行口中断, 返回。

对于串口接收数据, 我们采用中断方式来实现。在串行口中断服务子程序中, 首先关串行口中断, 接下来判断 RI 是否为 1, 如果为 1, 表示接收到数据, 这时将 RI 清零, 并将接收到的数据 (在 SBUF 中) 送到指定的存储单元中, 然后开串行口中断并返回。图 4.10 为串行口接收数据中断服务子程序的流程图。

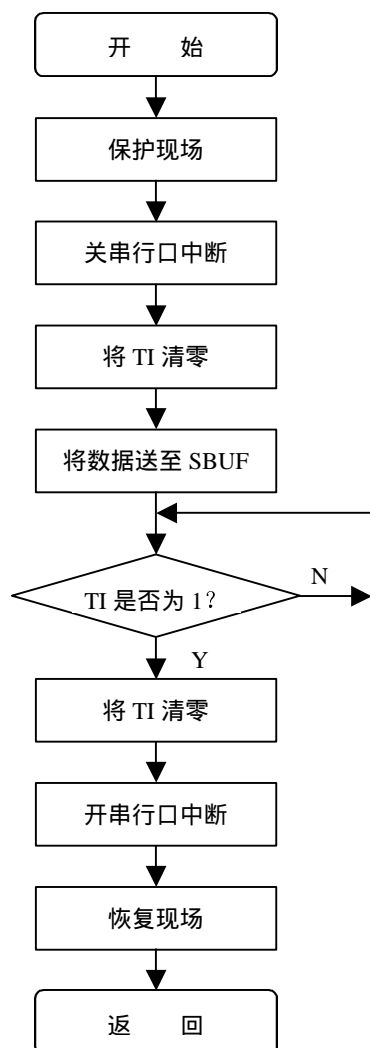


图 4.9 串行通讯数据发送子程序流程图

Fig. 4.9 Flow diagram of serial communication's data sending subprogram

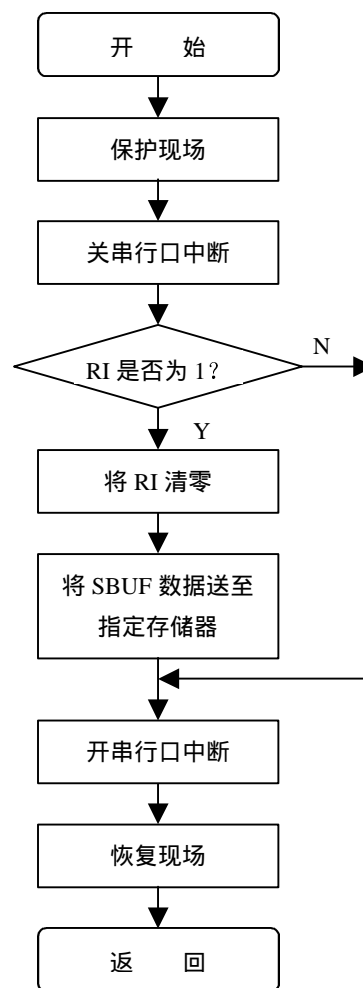


图 4.10 串行通讯数据接收中断服务子程序流程图

Fig. 4.10 Flow diagram of interrupt subprogram of serial communication's data receiving subprogram

4.5 上位机与下位机的通讯协议和通讯模块设计

上位机通过 PCL-731 I/O 卡与下位机的并行 I/O 口进行并行通讯，需要有相应的通讯协议和软件支持。为此，我们设计了以下通讯协议和通讯模块。

4.5.1 通讯协议

工控机发送给单片机的主要有指令和数据。为了将指令和数据区分开来，以便单片机接收到后能正确识别，我们采用帧的形式对指令和数据进行封装，对其格式作以下规定：

(1) 指令帧格式

起始字	指令字	结束字
-----	-----	-----

每个指令帧由起始字、指令字和结束字组成，它们各占 1 个字节，起始字规定为 0x1D，结束字规定为 0x1E。

(2) 数据帧格式

起始字	数据字	校验字	结束字
-----	-----	-----	-----

每个数据帧由起始字、数据字、校验字和结束字组成，其中起始字、校验字和结束字各为 1 个字节，数据字为 4 个字节。起始字和结束字分别规定为 0x3D 和 0x3E。每个数据帧传送 3 字节数据。为了实现数据传送的握手，即让单片机接收到数据时，能识别是第几个数据，我们将数据字和校验字的最后两位定义为识别标志位，而将 3 字节数据的最后两位组合成一个新的数据字，所以传送 3 字节数据需要 4 字节数据字。同时再增加一个校验字用于检验数据传送的正确性。这 4 字节数据字和 1 字节校验字的二进制表达形式的最后两位应分别是：00、01、10、11、00。

在通讯过程中，为保证工控机发送的数据能被单片机正确接收到，我们设计了如下通讯握手流程：

工控机：

- ① 通过输出端口发送数据；
- ② 从输入端口读回数据；
- ③ 比较两数据是否相等，若相同则返回 true，不同则重复②③，如比较次数超过 10000 次两数据仍不相同，则返回 false。

单片机：

- ② 从输入端口（该端口是单片机的输入端口，与上述输入端口不是同一端口）读取数据；
- ③ 比较判断输入数据是否属于指令帧或数据帧的一部分，如果属于，则从输出端口回送该数据；
- ④ 返回。

4.5.2 数据编码、校验和解码

根据通讯协议，工控机在发送数据之前，应先对数据进行编码。设要传送的 3 字节数据分别为 DATA1、DATA2 和 DATA3，编码之后的数据字和校验字为 SDATA1、SDATA2、SDATA3、SDATA4 和 SDATA_V，则编码方法如下：

$$SDATA1 = DATA1 \& 0xFC | 0$$

$$SDATA2=DATA2 \& 0xFC | 1$$

$$SDATA3=DATA3 \& 0xFC | 2$$

$$SDATA4=((DATA1 \& 3) \ll 6) + ((DATA2 \& 3) \ll 4) + ((DATA3 \& 3) \ll 2) | 3$$

$$SDATA5=(SDATA1+SDATA2+SDATA3+SDATA4) \& 0xFC | 0$$

单片机接收数据时，首先判断数据是否满足协议条件，如果满足，则将该数据回送给工控机，继续接收下一个数据。在接收完包括开始字和结束字在内的 7 个字节数据后，单片机需对接收到的数据进行校验，假设这 7 字节数据分别为 RDATA1~RDATA7，校验即是判断 RDATA6 是否等于 $(RDATA2+RDATA3+RDATA4+RDATA5) \& 0xfc$ 。相等则表示数据接收成功，这时即可按以下方法对数据进行解码。

$$DATA01=(RDATA2 \& 0xFC) | (RDATA5 \gg 6) \& 3)$$

$$DATA02=(RDATA3 \& 0xFC) | (RDATA5 \gg 4) \& 3)$$

$$DATA03=(RDATA4 \& 0xFC) | (RDATA5 \gg 2) \& 3)$$

DATA01、DATA02 和 DATA03 为解码后得到的数据。

4.5.3 通讯模块

根据以上通信协议和数据编码、校验及解码方法，我们设计了上位机和下位机通讯模块。试验表明，采用该通信协议设计的通讯模块可以实现上位机和下位机的正确、快速通讯，满足了功能要求。同时，该通讯协议还具有很好的开放性，其他外部智能装置根据该通信协议设计通讯模块，即可与该系统实现通讯，从而实现功能模块的扩展。

4.6 本章小结

本章介绍了 SCARA 机器人控制器软件系统的结构和功能，建立了 SCARA 机器人的几何模型，并基于该几何模型，采用 D-H 方法建立了运动学正解方程。根据控制系统的功能要求，采用 C++ Builder 开发工具，设计了上位机系统的人机界面控制、轨迹规划、运动控制、状态监控和参数设置等功能模块，并给出了控制指令表。采用汇编语言，编制了下位机系统的运动控制、键盘扫描、按键处理、串行通讯和警报处理等功能模块。设计了上位机与下位机的通讯协议，并基于该通讯协议设计了上、下位机通讯模块，实验表明，该协议具有通讯稳定、速度快、开放性好等特点。

第五章 SCARA 机器人综合实验

前面几章对 SCARA 机器人的本体设计、控制系统的硬件设计和软件设计进行了研究，本章将对机器人本体的性能、机器人控制器的功能性和稳定性进行实验。

5.1 SCARA 机器人控制器的稳定性实验

图 5.1 为 SCARA 机器人及其控制器的实物图。为检验机器人控制器的工作稳定性，我们对控制器进行以下稳定性试验。



图 5.1 SCARA 机器人及其控制器

Fig. 5.1 SCARA robot and its controller

实验方法 机器人首先回到零点位置，然后以 10mm/s 的速度作上升运动，运动到 450mm 位置停止，再向下运动，运动到下限位开关位置时停止，再向上运动，如此往复。

参数设置 运动速度为 10mm/s，移动距离为 450mm。

实验时间 每 8 小时为 1 个实验周期，每天做 1 个实验周期的实验，共 7 天。

在第 2 个实验周期，机器人上升到 450mm 时没有停止，而是继续向上运动，从而引起伺服警报，伺服主电路断开。经检查，PCL-731 I/O 卡与接口电路板之间的连接插头

接触不良，导致工控机与单片机不能正常通讯。更换连接插头后，故障消除。继续做了 7 个实验周期的实验，机器人控制器、升降臂工作正常。实验表明，该机器人控制器具有良好的工作稳定性。

5.2 SCARA 机器人的点位运动实验

该实验用于检验机器人定位的精确性。

实验方法 通过实验的“参数设置”界面输入起点和终点的关节变量值。实验开始时，机器人先回到零点位置，然后运动至起点位置，再运动至终点位置并停止运动。这时，对机器人的终点关节变量进行测量，计算与设定值之间的误差大小。

参数设置 升降关节运动速度为 15mm/s，大小臂关节运动速度为 3 /s。

表 5.1 列出了该机器人点位运动的实验结果。该结果表明，在点位运动中，机器人升降关节的定位精度可以达到 $\pm 0.3\text{mm}$ ，大臂关节的定位精度为 ± 0.6 ，小臂关节的定位精度为 ± 1.5 ，具有较好的点定位精度。由于小臂关节采用一级同步带传动，悬臂支承的刚性不佳，伺服电机的分辨率较低，从而其定位精度没有大臂关节好。根据需要，可通过采用大传动比的减速机构，或采用分辨率高的电机来提高定位精度。

表 5.1 SCARA 机器人点位运动实验结果

Table 5.1 Experiment result of SCARA robot's moving from point to point

实验序号		1	2	3	4	5	6	7	8
起点	升降关节 D_1	100	110	275	432	169	280	330	420
	大臂关节 θ_2	45	55	120	70	105	80	46	50
	小臂关节 θ_3	80	62	93	115	66	25	160	155
终点	升降关节 D_1	310	463	272	115	86	117	230	350
	大臂关节 θ_2	125	33	78	45	60	27	130	152
	小臂关节 θ_3	90	55	26	120	78	160	148	30
实测终点	升降关节 D_1	310.1	463.3	271.9	114.7	86.0	117.2	230.1	349.8
	大臂关节 θ_2	125.3	33.2	77.6	45.6	60.5	26.8	130.3	151.6
	小臂关节 θ_3	90.6	55.9	24.5	118.9	78.6	159.1	149.2	29.2
误差	升降关节 D_1	0.1	0.3	-0.1	-0.3	0	0.2	0.1	-0.2
	大臂关节 θ_2	0.3	0.2	-0.4	0.6	0.5	-0.2	0.3	-0.4
	小臂关节 θ_3	0.6	0.9	-1.5	-1.1	0.6	-0.9	1.2	-0.8

注：升降关节的单位为 mm，大臂关节和小臂关节的单位为 $^\circ$ 。

5.3 SCARA 机器人的连续运动实验

连续运动实验用于检验机器人按简单轨迹运动的运动效果。

实验方法 通过实验的“参数设置”界面输入起点、3 个中间点和终点的关节变量

值。实验开始时，机器人先回到零点位置，然后运动至起点位置，再顺序运动至各中间点位置，最后运动至终点位置并停止。这时，对机器人的终点关节变量值进行测量，计算与设定值之间的误差大小。

参数设置 升降关节运动速度为 15mm/s，大小臂关节运动速度为 3 /s。

表 5.2 列出了点到点运动的实验结果。限于篇幅，表中只列出了设定的起点、终点坐标和和实测终点关节变量值。该结果表明，在连续运动中，机器人升降关节的定位精度可以达到 $\pm 0.4\text{mm}$ ，大臂关节的定位精度为 ± 0.8 ，小臂关节的定位精度为 ± 1.9 ，具有较好的点定位精度。

表 5.2 SCARA 机器人连续运动实验结果

Table 5.2 Experiment result of SCARA robot's continuous moving

实验序号		1	2	3	4	5	6	7	8
起点	升降关节	31	122	60	210	372	226	115	252
	大臂关节	90	81	26	133	71	121	62	31
	小臂关节	121	25	37	112	162	137	82	51
终点	升降关节	62	341	50	120	270	42	420	92
	大臂关节	115	20	90	43	152	171	42	132
	小臂关节	20	65	132	58	169	37	68	100
实测终点	升降关节	61.8	341.3	50.2	119.6	270.2	42	420.4	91.7
	大臂关节	115.2	20.5	89.2	43.7	152.5	171.3	42.6	131.7
	小臂关节	20.3	63.4	130.5	59.9	169.6	35.8	69.5	99.8
误差	升降关节	-0.2	0.3	0.2	-0.4	0.2	0	0.4	-0.3
	大臂关节	0.2	0.5	-0.8	0.7	0.5	0.3	0.6	-0.3
	小臂关节	0.3	-1.6	-1.5	1.9	0.6	-1.2	1.5	-0.2

注：升降关节的单位为 mm，大臂关节和小臂关节的单位为 。

5.4 本章小结

本章在完成 SCARA 机器人控制器及样机设计和制作的基础上，进行了机器人控制器的稳定性实验、机器人的点位运动实验和连续运动实验。实验结果表明，SCARA 机器人控制器具有较好的工作稳定性和运动控制功能，机器人在点位运动和连续运动中具有较高的定位精度。通过对小臂的传动机构进行改进，可以使定位精度进一步提高。

第六章 总结与展望

6.1 总结

本论文针对机器人控制器开放性、模块化、标准化的发展要求,结合 SCARA 工业机器人的市场需求状况,研制了基于工控机和 Windows 2000 操作系统的开放式机器人控制器,并设计了 SCARA 机器人样机。主要突出的创造性工作如下:

(1) 建立了以工控机作为上位机,多个 STC89C51 单片机系统作为下位机的二级分布式机器人控制器体系结构,满足了开放式机器人控制器模块化和标准化的设计要求,便于系统的配置、维护和扩展。

(2) 建立了 SCARA 机器人的机械结构模型,并基于该机械结构模型,完成了 SCARA 机器人本体的三维建模和二维图设计。根据二维图和三维数模图加工、制作了主要机械部件,完成了 SCARA 机器人本体的装配和调试。

(3) 设计了单片机控制系统硬件电路,并制作了单片机控制电路板,完成了伺服电机驱动器的主电路配线和控制器硬件电路的配线。该控制电路不仅可以用于控制伺服电机以实现对各关节的运动控制,而且还可以作为通用控制电路,用于其他系统的控制。

(4) 采用 C++ Builder 和汇编语言设计了 SCARA 机器人控制机器人机界面计算机控制系统和单片机控制系统,并对硬件系统和软件系统进行了综合调试。软件控制系统人机界面友好,功能强大,可以实现轨迹规划、运动控制、状态监控和数据存储等功能。

(5) 完成了 SCARA 机器人控制器的工作稳定性实验、机器人点位运动和连续运动实验。实验表明,基于工控机和 Windows 2000 操作系统设计的开放式机器人控制器具有稳定性好、通用性强、操作简单、易于扩展、维护方便等特点。基于该控制器设计的 SCARA 机器人定位精度较高,生产成本低,功能扩展性强,具有广阔的市场前景和较强的市场竞争力。

6.2 有待进一步解决的问题

由于时间有限,SCARA 机器人控制器的部分功能未能实现,这些功能将在以后的学习和研究工作中继续完成。以下对这些功能及有待进一步解决的问题作简单归纳:

(1) 位姿求解。位姿求解建立了机器人的各关节变量和末端执行器的坐标之间的转换关系,是机器人运动控制的一项重要功能。根据 SCARA 机器人的数学模型和运动学逆解理论建立运动学正解和逆解模型,在软件中对该模型进行计算,即可实现位姿求解

功能。

(2) 示教再现。在现有的上位机软件控制系统的基础上, 通过设计机器人的高级运动指令系统和指令解释系统, 开发示教再现人机界面, 可实现示教再现功能。用户通过该界面控制机器人各关节按一定轨迹运动, 系统就可以用高级运动指令顺序记录下各关节的运作。通过再次执行这些指令所组成的程序, 即可使机器人按这些轨迹重复运动。

(3) 离线编程。离线编程的实现使机器人具有更好的柔性, 同时也使用户对机器人的控制变得更加灵活。为实现该功能, 需设计机器人的高级运动指令系统, 同时, 还应设计对用户编制的程序进行编译和解释的系统, 并为用户提供编程环境和编程说明书。用户根据指令格式编制好用户程序后, 交由编译系统编译解释, 转换成运动控制指令执行, 即可实现离线编程与运动控制功能的融合。

(4) 轨迹规划功能的完善。在位姿求解功能模块实现的基础上, 将轨迹规划、位姿求解和运动控制三个功能模块结合起来, 由位姿求解模块对轨迹规划所生成的中间点进行运动学反解, 运动控制模块根据求解的各关节变量值控制关节动作, 以实现机器人按预定的轨迹运动。除了直线和圆弧插补方法, 还可以实现多项式插补、抛物线插补等其他插补方法。

(5) 更友好的用户界面。在现有的系统中, 用户主要是通过键盘输入点的坐标值和选择插补方式来实现运动轨迹的输入。在后续开发中, 可以将轨迹规划设计成 3D 用户界面, 用户只需通过鼠标即可在 3D 界面中绘制机器人的空间运动轨迹。

(6) 网络功能。可以开发基于 TCP/IP 协议的上位机控制系统的网络功能模块, 从而使网络计算机通过局域网或互联网对该机器人进行远程监控。

(7) 接口模块。Pro/ENGINEER、MasterCam 等 CAD 软件具有自动生成加工 G 代码的功能。可以设计与这类 CAD 软件的接口模块, 通过接口模块直接读取由这些软件生成的 G 代码或通用格式文件, 并对其进行转换, 根据转换之后的位置数据控制机器人运动, 从而进一步增强机器人控制器的功能性和开放性。

参考文献

- [1] 吴振彪. 工业机器人[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1997.
- [2] 殷际英,何广平. 关节型机器人[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [3] 李绣峰. 机器人螺钉柔性装配位姿纠偏机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 1999.
- [4] Mearian, Lucas. The Coming Robot Revolution [J]. Computerworld, 2004, 38(28).
- [5] Machine-Tending Robots: Production's "Special Forces" [J]. MAN: Modern Applications News, 2004, 38(10).
- [6] Morrinc Jr., Frank. Robot Rescue [J]. Aviation Week & Space Technology, 2004, 160(23).
- [7] Gibbs, W. Wayt. Plug-and-Play Robots [J]. Scientific American, 2004, 290(4).
- [8] Poynder, Richard. The Latest from Spain, Singapore, the U.K., and Iraq [J]. Information Today, 2004, 21(9).
- [9] 余达太等. 工业机器人应用工程[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
- [10] 张铁, 谢存禧. 机器人学[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2001.
- [11] 孙富春, 朱纪洪, 刘国栋等译. 机器人学导论——分析、系统及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [12] 蔡鹤皋. 机器人技术的发展与在制造业中的应用[J]. 机械制造与自动化, 2004, 33(1): 6-7, 10.
- [13] UNECE, IFR. World Robotics 2005 – Statistics, Market Analysis, Forecasts, Case Studies and Profitability of Robot Investment [M]. 2005.
- [14] UNECE, IFR. World Robotics 2004 – Statistics, Market Analysis, Forecasts, Case Studies and Profitability of Robot Investment [M]. 2004.
- [15] UNECE, IFR. Robot Investments Surge To Record Levels [J].
http://www.unece.org/press/pr2005/05stat_p01e.pdf.
- [16] Mehmet Ismet Can Dede, Salim Nasser, Shusheng Ye, etc. Cerberus the Humanoid Robot: Part I—Design [J]. 2005 Florida Conference on Recent Advances in Robotics.
- [17] Fiedler P.J., Schilb C.J. Open Architecture Robot Controllers and Workcell Integration [J]. http://www.roboticonline.com/public/articles/Open_Architecture_Genesis.PDF
- [18] 赵文祥. 开放式机器人控制器的设计与研究[D]. 江苏: 江苏大学, 2003.
- [19] 时培涛. 开放式机器人控制器的控制软件与图形仿真研究[D]. 北京: 中国科学院自动化研究所, 2001.
- [20] 马光, 申桂英. 工业机器人的现状及发展趋势[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2002, (3): 48-51.
- [21] IEEE. 工业机器人技术现状及国内外发展趋势, 2003.
- [22] Mike Fitts, Leland Teschler. Absolutely Accurate [J]. Machine Design, 2004, 76(13).

- [23] Hiromi Takeuchi, Yoshifumi Terabayashi, Koichiro Yamauchi, Naohiro Ishii. Improvement of Robot Sensor by Integrating Information Using Neural Network [J]. International Journal of Artificial Intelligence Tools, 2003, 12(2):139-152.
- [24] 陈佩云,金茂菁,曲忠萍. 我国工业机器人发展现状[J]. 机器人技术与应用, 2001, (1): 2-5.
- [25] 王田苗. 工业机器人发展思考[J]. 机器人技术与应用, 2004, (2): 1-4.
- [26] William E. ford. What is an Open Architecture Robot Controller? 1994 IEEE International Symposium on Intelligent Control, 16-18 August, 1994. Columbus, Ohio, USA.
- [27] Saridis G.N. Architecture for Intelligent Controls [J]. IEEE Symposium on Implicit and Nonlinear Systems, December, 1992.
- [28] Albus J.S. A Reference Model Architecture for Intelligent Systems Design [J].
- [29] Albus J.S., Barbera A.J. RCS: A Cognitive Architecture for Intelligent Multi-agent Systems [J].
- [30] Albus, J.S., Outline for a Theory of Intelligence[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 21, No. 3, May/June 1991, pp. 473-509.
- [31] Hui-Min Huang. An Architecture and a Methodology for Intelligent Control [J]. IEEE Expert, April, 1996.
- [32] Albus J.S., Lumia R., Fiala J., Wavering A. NASREM -- The NASA/NBS Standard Reference Model for Telerobot Control System Architecture [J]. Proceedings of the 20th International Symposium on Industrial Robots, October, 1989.
- [33] Klas Nilsson. Integrated Architecture for Industrial Robot Programming and Control[J]. Robotics and Autonomous Systems, 1999, 29: 205-226.
- [34] 徐华,贾培发,赵雁南. 开放式机器人控制器软件体系结构研究进展[J]. 高技术通讯, 2003, (1): 100-105.
- [35] 黄立波,夏庭锴,王春香等. 实时环境下的对弈机器人控制系统设计与分析[J]. 机械, 2004, 31 (6): 50-52.
- [36] 张长生,贾宝才. 制造业自动化——先进制造技术的重要支柱[J]. 中国机械工程, 1995, 6(6): 5-8.
- [37] 王俊玲,曲忠萍. 国内生产企业应加快发展占领机器人市场[J]. 机器人技术与应用, 2004, (12): 12-13.
- [38] Mikell P. Groover, Mitchell Weiss, Roger N.Nagel etc. Industrial Robotics Technology, Programming and Applications[M]. R.R. Donnelley & Sons Company. 1986.
- [39] 张建民. 机电一体化系统设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996.
- [40] 方建军等. 光机电一体化系统设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [41] 成大先. 机械设计手册(单行本). 常用工程材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.1.
- [42] 单以才. 机器人机械操作臂的模块化设计及其控制的研究[D]. 扬州大学, 2003.
- [43] 张宏星,赵勇. CAD 技术及系统研究概述[J]. 机械工程师, 2004, (7): 7-9.
- [44] 郭肆伟,刘东学, 马爱亮. CAD 技术发展概述[J]. 化工装备技术, 2003, 24(3): 61-63.

- [45] 彭嵩. CAD 技术应用状况与发展趋势浅析[J]. 矿山机械, 2005, 33(2): 89-91.
- [46] 詹友刚. Pro/ENGINEER 中文野火版教程——通用模块[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [47] 林清安. Pro/ENGINEER Wildfire 2.0 零件设计基础篇(上)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [48] 唐荣锡. CAD 产业发展的回顾与思考(之四): PTC/ProE 参数化特征设计新天地[J]. 中国制造业信息化, 2005, (4): 34-35.
- [49] Parametric Technology Corporation. Pro/ENGINEER 宣传册. <http://www.ptc.com/appserver/wcms/cdaList.jsp?cg=841&rkey=403|3288&rc=n&forward=y&n=1>, 2005.
- [50] Yaskawa Electric Corporation. Σ -II Series SGMW/SGDM User's Manual. 2005.
- [51] 东北工学院《机械零件设计手册》编写组. 机械零件设计手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982.1.
- [52] 成大先. 机械设计手册(单行本). 机械传动[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.1.
- [53] 孙桓. 机械原理教程[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1987.
- [54] 强锡富. 传感器[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [55] SUNX Limited. GXL Series Micro-size Inductive Proximity Sensor. <http://www.sunx-ramco.com/SunxPDFFiles/GXL.pdf>.
- [56] 徐进, 齐勇, 王猛. 基于工控机的电脑刺绣机控制系统的设计与实现[J]. 微计算机信息, 2004, 20(10): 9-11.
- [57] 肖吉德. 步入工控机黄金岁月[J]. 电气时代, 2003, (6): 20-24.
- [58] 许心传. 浅谈工控机与现场总线[J]. 工业控制计算机, 2000, 13(6): 1-4.
- [59] 胡汉才. 单片机原理及接口技术(第2版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [60] 李绣峰. 机器人螺钉柔性装配位姿检测单片机的设计[J]. 五邑大学学报(自然科学版), 2002, 16(3): 20-23.
- [61] Advantech Co., Ltd. PCL-731 48-bit Digital I/O Card User's Manual, 1995.
- [62] 宏晶科技. STC89C51RC /RD+ 系统单片机中文指南, 2005.
- [63] 程展鹏. Borland C++ Builder 6 应用开发技术解析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [64] 刘华. Borland C++ Builder 程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
- [65] 魏涤非, 戴源生. 电机技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [66] 求是科技. 单片机通信技术与工程实践[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- [67] 陈建铎. 单片机原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.

作者攻读硕士期间发表的论文

1. 杨词慧,李绣峰. 基于 PLC 和单片机的绕线机控制系统设计. 西南交通大学学报, 2006, 41 (Sup): 120-122, 129.
2. 杨词慧,李绣峰. 单片机在摩托车钢圈生产中的应用. 五邑大学学报(自然科学版), 2006, 20 (1): 44-47.
3. 杨词慧,耿爱农. 基于 ASP 技术的研究生网上调剂系统的实现. 五邑大学学报(自然科学版), 2005, 19 (2): 38-41.
4. 杨词慧. 多媒体信息检索与数据库信息检索. 中国信息导报, 2005, 434(2): 53-55.

致 谢

本论文在导师李绣峰副教授的悉心指导下得以完成，在整个论文的选题、研究与撰写期间，始终得到了导师精心的指导、热情的鼓励和支持。在两年半的硕士学习和课题研究中，导师不仅在学业上指导我，使我学到了许多专业知识，而且在生活上给予我深切的关怀和帮助，使我终生难忘；导师渊博的知识、严谨的治学态度、高瞻远瞩的学术思想和无私的奉献精神使我终生受益。值此论文完成之际，我谨向导师致以最崇高的敬意和最衷心的感谢！

感谢熊焕庭教授、杨铁牛教授、王建生教授、王大承教授、孔凡国副教授、耿爱农副教授、史天录副教授、杜遥雪教授等在学习和课题研究中给予的耐心指导和关怀，使我能够顺利地完成学业和论文工作。

感谢江门市福莱利汽车配件有限公司吴健、杨建华等工程师在机器人机械部件加工和装配过程中所给予的大力支持和帮助，使我能顺利完成机器人本体的加工、制作和装配。

感谢张尚先、阮铭业、黎建辉、陈松青、石彩华同学和向鹏、余运昌、程国飞、戴剑青、庞君杰、王小东、蔡晓娜、曾华、孙勇、黄伟、刘刚、卢至孟、欧阳兆彰、郑为东、董艳荣、李钰、刘冬霞等师弟师妹，和他们在一起度过了许多美好、快乐的时光，这将成为我一生中最美好的回忆。

特别感谢我的父母和家人，正是他们在物质和精神上的支持与鼓励，使我得以潜心于学业，顺利完成本论文。

最后，对所有关心和帮助我的老师、同学和朋友都表示诚挚的感谢。