

摘 要

近二十年来, 机器人技术发展非常迅速, 各种用途的机器人在各个领域广泛获得应用。我国在机器人的研究和应用方面与工业化国家相比还有一定的差距, 因此研究和设计各种用途的机器人特别是工业机器人、培养机器人技术人才、推广机器人的应用是有现实意义的。本文的工作是围绕一个六自由度的教学机器人系统的开发和设计进行的。

论文首先根据教学机器人的任务要求, 确定机器人的各项基本技术指标, 为机器人系统的设计提供依据; 在此基础上, 通过分析比较, 提出机器人的六自由度关节型总体结构型式, 确立了采用直流力矩电机驱动、谐波减速器传动、增量式光电编码器检测的总体方案; 介绍了控制系统总体框架。

采用改进的 D-H 法建立教学机器人的数学模型, 对其运动学正解、雅可比矩阵进行求解, 采用代数逆解方法求得其逆解。并对工具的变换和采用不同基坐标的情况进行分析, 指明了使求解方法通用化的方法。运用 MATLAB 软件对教学机器人的工作空间进行了分析, 仿真分析了传感器、减速器误差以及加工制造误差引起的末端位置误差。

对机器人本体结构进行设计。在对机器人关节工作状况进行分析的基础上, 选择各关节电机、减速器的型号。对各关节的结构进行了详细的设计, 校核了部分关键零件, 给出了典型关节的装配图, 并对整个机器人本体进行了虚拟设计, 给出了三维仿真模型。

建立了关节控制的数学模型, 提出采用速度、位置双闭环的控制策略来实现关节控制, 运用 MATLAB 软件辅助设计方法设计了速度、位置 PID 控制器。

最后探讨了教学机器人轨迹规划的有关问题, 给出了运动学正、逆解的程序实现方法, 关节空间插补方法, 笛卡儿空间直线、平面圆弧、空间圆弧插补算法。

关键词: 机械手; 教学机器人; 运动学; 位置伺服系统

Abstract

In the past twenty years, the robot technology has been developed greatly and used in many different fields. There is a large gap between our country and the developed countries in research and application of the robot technology so that there will be a great value to study, design, and apply different kinds of robots especially industrial robots and cultivate person with ability in robotic. Allowing for the demand of teaching and scientific research, a teaching robot system is developed. The research is about the design of a teaching robot system with six degree of freedom.

At first, according all demands that related, an expected technology criterion has been proposed as a basic goal in this paper. Basing on that goal and many examples, this robot adopted six degree of freedom architecture. The scheme of DC motor with harmonic reducer and incremental encoder are proposed. The control system scheme also has been introduced.

The kinematical model of the robot is analyzed and established and also the forward and inverse kinematical equation is obtained. An algebraic is proposed to obtain the solutions of this model and the Jacobin matrix is deducted. The method is presented to insure this model can adapt various reference frames. The workspace and the position error are analyzed in the MATLAB software environment.

In particular, the structure design is introduced in the paper. The type of DC motor, harmonic reducer and incremental encoder are selected. Some crucial parts are checked and the assemble graph and 3D model are presented.

The model of joint servo system on the teaching robot has been established and analyzed. Position and velocity feedback method is adapted to control the joint and control parameters are obtained in the MATLAB software environment.

Finally, some issues about trajectory planning of the teaching robot system

are probed into in the paper. Some crucial arithmetic about forward and inverse kinematics and interpolation are designed in detail.

Keywords: manipulator; teaching robot; kinematics; position control system

哈尔滨工程大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：本论文的所有工作，是在导师的指导下，由作者本人独立完成的。有关观点、方法、数据和文献等的引用已在文中指出，并与参考文献相对应。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已公开发表的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者（签字）：姜健荣

日期：07年3月6日

第 1 章 绪论

1.1 课题来源及研究意义

机器人是典型的机电一体化装备，除了在制造业、农业、医疗、海洋开发、航天工程等方面得到了越来越广泛的应用之外，也已经渗透到人们生活的各个方面，随着工业机器人向更深更广方向的发展以及机器人智能化水平的提高，机器人的应用范围还在不断地扩大。机器人产品技术附加值很高，应用范围很广，机器人产业是正在快速成长中的新兴产业，将对未来生产和社会发展起越来越重要的作用。国外专家预测机器人产业是继汽车、计算机之后出现的新的的大型高技术产业^[1]。在这样的背景下，机器人技术与相关方面人才的需求也迅速增加，各高校也相应加大了对机器人技术人才的培养力度^{[2][3]}。

教学机器人作为这种先进技术的实物载体，在教学中的位置越来越重要。它融合了造型技术、机械、电子、传感器、计算机软件、硬件等众多先进技术，可为各相关技术课程教学提供很好的教学平台。目前，随着机器人相关课程教学改革的逐步深入，国内一些高校加大了这方面的投入，或购买工业机器人加以改造，或进行了专门的研制^{[4][5]}。一些公司也瞄准这一市场，进行了有针对性的研发。近年，已有不同型式的教学机器人相继问世，如上海交大的 EDUR0BOT-680-II 型、天津探索智能机械公司的 TS-501 型以及哈尔滨工业大学博实精密测控有限责任公司研制的几种不同自由度数的教学机器人产品等。但总体上应用的规模仍有待扩大，而且部分产品价格偏高，加之，购买的教学机器人产品的开放性有限，不利于教学改革过程中的维护和进一步升级^[6]。

因应学校工程训练中心教学改革需要，配合我校本科生和研究生《机器人学》、《机器人技术》及《机电一体化系统设计》等课程的教学工作，以及进一步推动我校创新活动的开展，学校决定研制适合我校教学要求的教学机

器人。本课题就是在这个背景下开展工作的。

1.2 国内外工业机器人的发展概况

1.2.1 工业机器人的发展历史以及应用现状

“机器人”是人类想象中创造出的一种像人一样能够代替人去完成各种各样的工作的机器，早在三千年前机器人的概念已在人类的想象中诞生，公元前 1066 年，我国西周时代就流传有周穆王与歌舞机器人（艺伎）的故事。公元前 3 世纪，古希腊发明者为克里特岛国王制造了一个守卫宝岛的青铜卫士。我国东汉时间，张衡发明的指南车可算是世界上最早的机器人雏形。

“机器人”的说法最早产生于 1920 年捷克剧作家卡雷尔·凯培克(Karel Capek)的一部幻想剧《罗萨姆的万能机器人》中。1950 年，美国科幻小说家阿西莫夫在他的小说《我是机器人》中，提出了有名的“机器人三守则”，给机器人赋以新的伦理性。

机器人形象的产生说明人类对于先进生产工具的追求，人们的这种愿望给科学技术研究提出了一个新课题，这便是工业机器人产生的背景。

机器人的发展大体上经历了以下几个阶段：

1. 研制阶段

美国原子能委员会的阿尔贡研究所为了解决代替人处理放射性物质，于 1947 年研制遥控机械手；1948 年又开发了电气驱动的机械式主从机械手，解决了对放射性材料的远距离操作问题。

1951 年，美国麻省理工学院（MIT）开发成功了第一代数控机床，与 NC 机床相关的控制技术及机械零部件的研究，为机器人的开发奠定了技术基础。

1954 年，美国人乔治·德沃尔（Devol）最早提出了工业机器人的方案，设计并研制了第一台可编程序的电气工业机器人样机，并于 1961 年发表了该项机器人专利。

2. 生产定型阶段

20 世纪 60 年代初美国 Consolidated Control 公司与 Devol 结合，成立了

Unimation 公司。1962 年定型生产了 Unimate 工业机器人。同时，美国“机床与铸造公司”（AMF）设计制造了另一种可编程的工业机器人 Versation。这两种型号的机器人以“示教再现”的方式在汽车生产线上成功地代替工人进行传送、焊接、喷漆等作业，它们在工作中表现出来的经济效益、可靠性、灵活性，使其它发达国家工业界为之倾倒。于是，Unimate 和 Versation 作为商品开始在世界市场上销售。

3. 推广应用阶段

1970 年，第一次国际工业机器人会议在美国举行，工业机器人多种卓有成效的实用范例促进了机器人应用领域的进一步扩展。同时，又由于不同应用场合的特点，导致了各种坐标系统、各种结构的机器人相继出现。

西德 Kuka 公司生产了一种点焊机器人，采用关节式结构和程序控制；瑞士 RETAB 公司生产一种涂漆用机器人，采用示教方法编制控制程序；日本是工业机器人发展最快、应用最多的国家。1967 年，日本丰田纺织自动化公司购买了第一台 Versation 机器人，1968 年，川崎重工业公司从美国引进 Unimate 机器人生产技术，开始了日本机器人发展的时代。60 年代末，日本大力发展经济型的机器人。成功地把机器人应用到汽车工业、铸塑工业、机械制造业，从而大大提高了制成品的质量和一致性，形成了一定规模的机器人产业。这样，日本一跃成为机器人王国。

4. 产业化、实用化、商品化阶段

随着大规模集成电路技术的飞跃发展，微型计算机性能的不断提高和普遍应用，机器人的控制性能大幅度地得到提高，成本不断下降。工业机器人进入了商品化和实用化阶段，形成了大规模化的机器人产业。80 年代工业机器人技术得到了巨大发展，所开发的四大类型机器人产品（点焊、弧焊、喷漆、上下料）主要用于汽车工业。由于汽车工业装备更新的变化，工业机器人出现了暂时的相对饱和现象。随着以提高产品质量为目标的装配机器人及柔性装配线的开发成功，到 1989 年机器人产业又出现了转机，首先在日本，之后在各主要工业国家又呈发展趋势。进入 90 年代后，装配工业机器人及柔性装配技术进入了大发展时期，由于不同用途的要求，使不同结构、不同控

制方法、不同种类的机器人相继出现，又促进了机器人的发展。

自 20 世纪 80 年代以来，国际机器人的发展速度平均保持在 25%—30% 的年增长率。这是由于工业自动化正朝着“柔性生产”方向发展，以适应多品种、中小批量生产或混流生产的需要。80 年代末，各国把发展的目标调整到以多传感器为基础的计算机辅助遥控加上局部自主功能，作为发展非结构环境下工作的机器人技术方向。

1995 年以来，世界机器人数量逐年增加，增长率也较高。到 2000 年，服役的机器人大约 100 万台，机器人技术仍维持较好的发展势头，跨入 21 世纪的头两年，由于受全球总体经济形势不景气的影响，机器人的产量和投资都有所回落，到 2003 年，由于经济的好转，加之服务机器人的增加，这一趋势有了反弹，2004 年和 2005 年都有强劲的发展。专家估计，2005 年到 2008 年，机器人产业仍会有稳健的发展，全球工业机器人的平均增长率将达 6% [1,7-16]。

生产和维护这么大量的机器人，无疑需要一大批机器人方面的技术人员。世界机器人产业的发展已经向我们展示了一个巨大的未来人才市场。同时，这也是教育行业应当担负的一项艰巨而又有意义的使命。

1.2.2 我国工业机器人的发展现状

我国机器人技术大约起步于 20 世纪 70 年代，自 1975 年日本川崎重工在北京展示了 Unimate-2000 型工业机器人之后形成研制机器人的热潮。先后有 100 多个单位，上千名技术人员投入研究工作，到 80 年代中期，我国已研制了 100 多台工业机器人，其中有 6 台为示教再现型，形成了生产第一批工业机器人的技术能力，缩短了与国外的差距。在 1985 年，先后有几个国家级学会设立了机器人专业委员会，以组织和开展机器人学科的学术交流，促进机器人技术的发展。1987 年，北京首届国际机器人展览会上，我国展出了 10 余台自行研制的工业机器人。

“七·五”期间，制订了国家“863”发展规划，在自动化领域中设立了智能机器人主题研究方向，经过“七·五”、“八·五”攻关，我国研制了各

种类型的机器人，已初步形成了工业机器人的产业化，生产的工业机器人已达到了工业应用水平。智能机器人也列入了国家高技术行列，经过了近 20 年的努力，我国的智能机器人研究与开发已取得了丰硕的成果。

进入 21 世纪，世界经济结构正在发生重大而深刻的变革，但制造业依然是世界各发达与发展中国家加快经济发展、提高国家综合竞争力的重要途径。我国是一个制造业大国，尚处于工业化进程之中，在未来相当长的时间里，制造业仍将在国民经济中占主导地位。在新一轮国际产业结构调整中，我国正逐步成为世界最重要的制造业基地之一。然而目前我国装备制造业的整体水平与发达国家相比尚有较大的差距，尤其是在战略必争装备技术与竞争前核心技术、基础制造装备与成套关键装备制造技术等方面差距更大，这种差距又主要体现在先进装备的自主设计与独立制造能力差，成套与系统集成、优化能力差，技术创新和集成创新能力差。这些差距已经成为制约我国制造业乃至其他行业经济发展的关键瓶颈问题之一^[1,7-16]。由此可见，我国国民经济和社会发展对机器人技术和机器人技术人才的培养产生了比较迫切的需求。

1.3 本论文主要完成的工作

本课题“教学机器人本体设计及其关键技术研究”是要研制一套用于机器人技术教学和科研的实验系统设备。

论文主要完成以下工作：

- 1、完成教学机器人系统的总体设计。针对教学和科研的要求，对教学机器人系统的总体功能要求和性能进行设计。
- 2、建立教学机器人数学模型，并进行运动分析。
- 3、完成教学机器人机械结构设计并进行加工制造。
- 4、对关节伺服系统进行研究。
- 5、对教学机器人轨迹规划问题进行探讨，对关键算法进行研究。

第 2 章 六自由度教学机器人系统总体设计

2.1 引言

教学机器人系统是一个典型的机电一体化系统。从组成原理上讲，它由机械本体结构、伺服驱动系统、传感检测系统和控制系统组成。从物理层面上讲，它主要由机器人本体、机器人控制柜、接口电缆和 PC 机组成。如图 2.1 所示。



图 2.1 机器人系统组成

本章首先根据任务要求拟定机器人的基本技术参数，然后确定其基本的结构形式以及手腕配置形式，对其驱动方式、传动系统以及传感检测系统进行比较选择，最后，介绍控制系统总体框架。

2.2 教学机器人系统的基本技术要求

2.2.1 教学机器人的自由度

人们期望机器人能够以准确的方位把它的端部执行装置或与它连接的工具有移动到给定点，这就要求机器人具有一定数量的自由度。机器人的自由度数目应该与所要完成的任务相匹配。本系统中，为了使教学机器人系统具有更强的功能，能够完成更复杂的任务，将其自由度数目定为 6 个。第 6 关节预留适配接口，可以安装不同的末端执行器（手爪）以适应不同的任务要求。

2.2.2 教学机器人的工作空间

在执行工作任务时，机器人必须能够达到若干工件和夹具的位置。工作空间的大小不仅与机器人的各连杆的尺寸有关，并且与它的总体构型有关。在工作空间内还要注意连杆自身的干涉，以及防止与作业环境的物体发生碰撞。此外，还要注意工作空间某些形位的奇异性。

本教学机器人系统要完成的任务不是确定的，在此，可以先只拟定其最大回转半径不小于 700mm。

2.2.3 教学机器人的负载能力和速度要求

不同的运行速度下，机器人的负载能力是不同的。在选择机器人时，应综合考虑负载能力和运行速度。

为了提高生产效率，通常要求机器人具有较高的运行速度，然而对于某些应用场合，速度的大小由操作性质决定而不取决于机器人本身的速度。另外，机器人末端的最大速度和总体循环时间是有很区别的，运动循环过程包括启动加速、等速运动和减速制动三个阶段。为了保证精度，通常要在启动和减速阶段花费较长的时间，因此提高加、减速的能力非常重要。

机器人的负载能力与其结构尺寸、动力传递系统和驱动器有关。施加到驱动器和驱动系统的负载是随着机器人的结构、支承负载的时间长短以及由于惯性力、与速度、加速度有关的力产生的动载荷而变化的。

表 2.1 机器人关节的速度、加速度指标

关节名	S	L	U	R	B	T
序号	1	2	3	4	5	6
速度 (Rad/s)	0.56	0.26	0.65	0.875	0.875	1.22
加速度 (Rad/s ²)	3.5	2.62	3.5	3.5	3.5	3.5

考虑到教学机器人系统的实际要求，拟定各关节最大速度、最大加速度如表 2.1。考虑到教学机器人主要只是完成一些演示工作，负载很小，拟定其末端负载能力 0.5kg（含手爪重量）。

2.2.4 教学机器人的精度要求

定位精度和重复精度是机器人的两个精度指标。定位精度是指机器人末端件的实际位置与理想位置之间的差距。重复定位精度是指在相同的位置指令之下，机器人连续重复运动若干次，其位置的分散情况。引起定位误差的因素并不一定对重复精度有影响。如重力变形对定位误差影响较大，但对重复性没有影响，因为重力变形引起的误差是重复出现的。

影响机器人精度的因素很多，这里拟定其定位精度为 5mm。

2.3 教学机器人的结构型式

在确定了机器人的自由度数之后，必须合理的布置各关节来实现这些自由度。对于串联的运动连杆，关节数目等于要求的自由度数目。同时，机器人的结构形式与机器人运动学逆解有着非常密切的关系。一般的六自由度机器人不具有封闭解。尽管运动学方面的一个重要成果指出，所有包含转动关节和移动关节的串联 6 自由度机构均是可解的，但这种解一般是数值形式的，而存在封闭解的机器人具有以下特性：存在几个正交关节轴或者有多个连杆转角为 0 或 $\pm 90^\circ$ ，对具有 6 个旋转关节的机器人存在封闭解的充分条件是相邻的三个关节轴线相交于一点。由于计算数值解远比封闭解费时，数值解很难用于实时控制，因此，当今设计的六自由度串联机器人几乎都有三根相交轴，且大多数是设计成后 3 个关节相交，相交点称为腕关节原点。这样，后 3 个关节就确定了末端执行器的姿态，而前 3 个关节确定腕关节原点的位置。采用这种方法设计的机器人可以认为是由定位结构及其后面串联的定向结构或手腕组成的。这样设计出来的机器人都有封闭解。另外，定位结构都采用这样的简单结构：连杆转角为 0 或 $\pm 90^\circ$ ，连杆长度不同，但是连杆偏距都为 0，这样的结构会使计算简单。

常用的前三个关节（定位结构）的设计形式有以下几种（日本机器人协会，1996）：直角坐标机器人、柱面坐标机器人、球面坐标机器人、关节型机器人，SCARA 型机器人。由于在同样的体积条件下，关节型机器人比非关

节型机器人有更大的相对空间(手腕可达到的最大空间体积与机器人本体外壳体积之比)和绝对工作空间,结构紧凑,同时关节型机器人的动作和轨迹更灵活,因此设计的教学机器人采用关节型结构。

手腕的构形也有多种形式。三自由度的手腕通常有以下四种形式 BBR 型、BRR 型、RBR 型和 RRR 型。如图 2.2 所示。由于三轴相交在运动学求解中的优点,这四种构型又以 RBR 型使用最多。

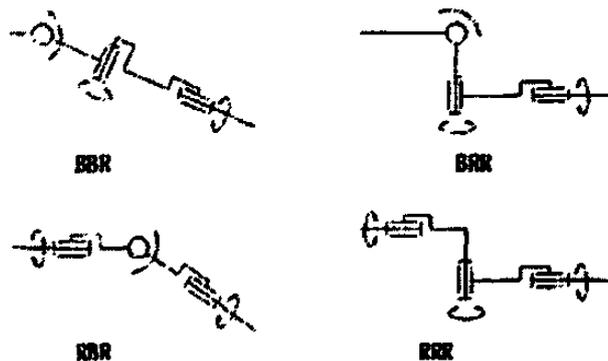


图 2.2 四种常见的手腕构型

最后,拟定的机器人结构如图 2.3 所示。

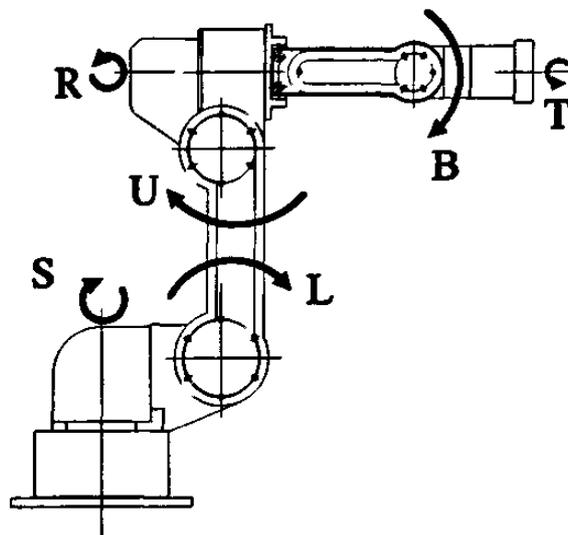


图 2.3 机器人总体构型

2.4 教学机器人驱动方式和传感检测方式选择

2.4.1 机器人的驱动方式选择

通常,机器人驱动方式有以下几种:

1) 气压驱动

使用压力通常在 0.4~0.6Mpa, 最高可达 1Mpa。其主要优点是: 气源方便 (特别是在工厂有压缩空气站专门供应压缩空气时), 可方便的实现直线运动, 驱动系统具有缓冲作用, 结构简单, 成本低; 其主要的缺点是: 功率密度比小, 驱动装置体积大, 实现转动需要中间传动机构, 定位精度低。

2) 液压驱动

液压驱动的最大特点是功率密度大, 用于水下时无需特别考虑密封问题, 液压缸驱动可以方便的实现直线运动, 液压马达可以方便的实现转动, 考虑到液压伺服技术的进步, 其动态控制性能也可以做得很好。其缺点是容易漏油, 污染环境, 加之有噪声, 且需要专门的油源。

3) 电气驱动

通常电气驱动又分步进电机驱动、直流电机驱动和交流电机驱动。

步进电机驱动可直接实现数字控制, 控制结构简单, 控制性能好, 而且成本低廉; 通常不需要反馈就能对位置和速度进行控制, 位置误差不会积累; 具有自锁能力(变磁阻式)和保持转矩(永磁式)的能力, 有利于控制系统的定位。但步进电机基本上不具有过载能力, 启动频率受到限制, 且需要专门的电源。功率偏大时, 体积较大, 并且其空间分辨率较低, 只适于传动功率不大的关节或小型机器人。

直流电机驱动主要有两种类型, 大惯量直流力矩电机直接驱动和小惯量直流伺服电机通过减速器驱动负载。它们的共同特点是快速性好, 控制精度高, 对转角无限制, 驱动功率较大, 调速性能好。可方便的采用转动式传感器实现速度、位置闭环控制, 是最为常用的驱动方式。

交流伺服电机结构较简单, 体积较小, 运行可靠, 使用维修方便, 价格比直流伺服电机便宜, 但高于步进电机。过去由于调速的成本过高, 限制了其在高性能调速要求方面的应用, 随着可关断晶闸管 GTO、大功率晶闸管 GTR 和场效应管 MOSFET 等电子器件、变频调速技术和计算机控制技术的发展, 交流伺服电机在调速性能方面现在也可以与直流电机媲美。采用 16 位 CPU+32 位 DSP 三环(位置、速度、电流)全数字控制, 增量式码盘的反馈

可达到很高的精度。三倍过载输出扭矩可以实现很大的启动功率，提供很高的响应速度。在功率较大的场合大有取代直流电机之势。

本教学机器人主要是用于教学和科研的，它将作为一个机电一体化的产品展示给学生，首先排除用气动驱动和液压驱动的可能，考虑到步进电机更多的用于开环控制、需专用控制电源以及驱动功率有限，不适宜采用，交流和直流都可以选择，考虑到功率不是很大，加之直流电机的控制技术更为成熟，因此，决定采用直流电机驱动方式。

2.4.2 机器人的传动系统及其传感检测方案选择

电机输出的转速一般比关节所需要的转速要大得多，而电机轴的输出转矩通常又要比期望的负载转矩小得多，这就要求采用合理的传动系统来实现合理的负载功率匹配，获得希望的运动形式。传动系统的种类很多，减速器的种类就有很多种，它们的精度、效率、体积、重量各异。在选择时要考虑以下因素：

1) 传动系统的精度：由于结构原理和制造工艺的原因，各种传动链的传动精度差异很大，不同精度等级的同种传感器的差异也很大。传动链的精度对系统的综合精度有很大的影响，尽管可以通过闭环控制补偿传动误差来提高系统的精度，但这种补偿是有限度的，如果传动链的间隙过大，或者刚度太低，即使使用最先进的控制方法也很难获得很高的控制精度。

2) 传动系统的结构形式：传动系统的结构形式很大程度上影响机器人关节的形状尺寸，影响其质量分布和惯量矩阵。对于小负载的机器人，传动机构的质量将会是驱动系统的主要负载之一，对系统的快速性有很大的影响。

3) 传动系统的效率：不同的传动系统的效率是有着很大差异的，在某些场合，效率对选择传动系统起着至关重要的作用，例如水下无缆机器人及其它电池供电的场合，对效率的要求是非常高的。另外，效率低，那么所选的驱动元件的重量、体积、驱动功率等都要加大。

4) 传动系统的选择要与驱动元件及检测元件匹配。例如，电液伺服元件一般与负载直接耦合以直接驱动方式工作，步进电机一般也不需要减速器，

而小惯量直流伺服电机一般需接大传动比的减速机构工作。另外，传动系统也会影响传感器的安装。

常见的传动装置有齿轮、同步带、链、丝杠、蜗轮蜗杆、钢缆、谐波齿轮传动装置等。这里选用谐波齿轮减速器。谐波齿轮传动机构是一种依靠齿轮的弹性变形运动来达到传动目的的新型传动机构，它具有结构简单，质量轻，传动比大，精度高等特点。

实际上所有的机器人都安装有传感器，一般又将其分为内部传感器和外部传感器。外部传感器是机器人系统主要用来感知外部环境的传感器，例如，视觉传感器、语音识别传感器等。内部传感器如关节位置、速度、加速度检测传感器，力传感器等。

这里主要考虑机器人关节的位置和速度检测传感方案。最常用的位置和速度传感器有旋转光学编码器、感应同步器、电位计、转速计。

电位计是最直接的位置检测形式，价格低廉。它连接在电桥中，能够产生与轴角成比例的电压信号。然而，由于分辨率低、线性度不好以及对噪声敏感，所以它的使用范围受到限制。

转速计能够输出与轴的转速成正比的模拟信号。但是，通常都采用对检测到的位置信号对于时间的差分得到速度反馈信号，尽管这种数值微分会产生噪声和延时，而较少使用转速计。

旋转编码器是最常用的位置反馈元件，有光电式和磁电式之分，其中光电式更为常用。光电传感器又分增量式和绝对式。光电编码器的精度高（每转脉冲数可达 10000），输出量为脉冲量，抗干扰能力较强，使用方便，增量式转角测量范围无限，绝对式一般转角范围是 0~360 度。相同精度下，绝对式一般比增量式价格高。

感应同步器也称分解器（resolver），它是用来对位置进行感应的电磁装置。分解器的输出信号通常需要专门的解码芯片来处理，且价格较高。但是它能承受工业环境，尤其是在震动和高温环境下比增量式编码器要好，加之它能提供绝对位置，所以它的使用量也在增加。

这里考虑关节结构的紧凑以及成本因素，选用增量式编码器，直接安装

在电机高速端，如图 2.4 (a) 所示，其检测精度=(传感器精度/传动比)+减速器精度。通过数值微分可以同时得到速度反馈。为获得绝对位置，每次运行前都需对初始零位进行校对。图 2.4 (b) 也是可行的，且可以获得很好的精度，但是成本高。

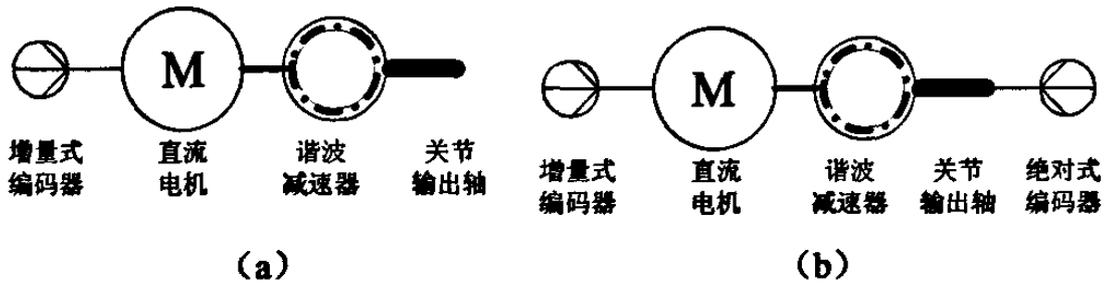


图 2.4 检测方案示意图

2.5 系统软件构架

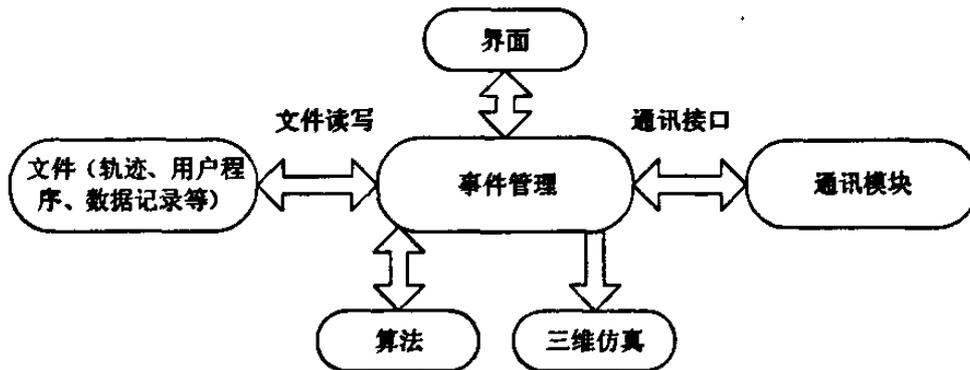


图 2.5 软件系统构架

这里系统软件指的是在上位 PC 机上运行的软件。教学机器人的软件系统是机器人运动和控制的结合点，是实现人与机器人通讯的主要方法。软件系统采用如图 2.5 的体系结构，整个软件系统分为六个模块：事件管理、界面、算法、三维仿真、通讯模块、文件管理。这样将庞大的软件系统分成了独立的模块，方便于软件的设计、调试以及维护。采用基于 Windows 操作系统的 Microsoft Visual C++编程实现。

界面是人与计算机的交互接口，操作人员通过对界面的操作完成各种功能。它不仅可以替代传统的单片机控制的示教盒，方便地完成对教学机器人的各种操作，同时还可以显示机器人的三维仿真。

文件管理模块实现对各种文件（如用户编制的工作程序，记录的示教轨迹等）的存储、删除、复制、编辑等。

算法模块实现机器人的运动学和动力学解算。包括运动学正反解、各种插值运算、各种坐标系下的运动转换等。

三维仿真实现机器人的模拟运动，三维显示采用 OpenGL 技术实现。它可以在机器人运动之前，检验示教程序是否按预设的要求运动，避免不必要的误动作，非常符合机器人教学工作的需要。

通讯模块实现上位 PC 机与下位控制器之间的通讯。

事件管理是基于 Visual C++ 可视化编程的核心概念之一。事件管理模块统一协调和管理其它各模块。它响应界面操作发出的各种指令，将要求的结果显示在界面上；它可以通过接口函数调用算法模块和三维仿真模块；它能够对文件模块进行读写管理；它还通过接口给控制器发送数据和接收反馈信息。

2.6 本章小结

本章从总体上对教学机器人系统进行了设计。首先，综合考虑教学机器人的任务要求拟定了机器人的各项基本技术要求，它是进行机器人设计最基本的依据，是机器人系统设计的首要任务。然后，根据拟定的基本技术要求，确定了机器人的结构形式。在此基础上，通过分析比较，对机器人的驱动方式、传动系统、检测系统、软件系统进行了总体设计。

第3章 六自由度教学机器人运动分析

3.1 引言

机器人运动学问题的主要研究内容是机器人各连杆间的位置关系、速度关系和加速度关系,分为运动学正分析(正运动学问题)和运动学逆分析(逆运动学问题)两部分。运动学正分析主要解决机器人运动方程的建立及手部(末端)位姿的求解问题,即实现由关节空间到笛卡尔空间的变换。运动学逆分析和运动学正分析相反,是在已知手部(末端)空间位姿的情况下,求解出关节变量,它主要用于机器人的控制及轨迹规划。

3.2 坐标系的建立

机器人工程师要对机器人进行运动学分析,首先就要建立机器人的数学模型。建模的用途在于:1)通过数据库描述控制单元;2)向其他机器人工程师解释机器人。即在不考虑机器人的本身和操作负载的动力学问题的情况下,给出一个机器人的工作说明。机器人(操作臂)最简单的运动学上的模型化方法是运动学链(kinematic chain)概念的方法。

要用数学模型描述运动链,首先就应该合理的描述各连杆以及相邻连杆间的位置关系。Denavit和Hartenberg于1955年提出一种用4个参数 $\{a, \alpha, d, \theta\}$ 来唯一描述连杆以及相邻连杆位置关系的方法,即通常所说的D-H法。 a 和 α 描述的是连杆两端关节轴线的距离和夹角,由连杆的结构确定,是常数。 d 和 θ 描述的是相邻连杆的位置关系。按Denavit和Hartenberg的方法建立的坐标系是传动轴坐标系,这种建立杆坐标系方法有一个明显的缺点是:对于树形结构或含闭链的机器人,有的杆上会存在多于一个传动轴,这时用D-H法建立的杆坐标系时会产生歧义。1986年Khalil和Kleininger对D-H法进行了修改,克服了上述问题。国内有些文献将原来的D-H法和修改后的D-H法分别称为上关节设置法和下关节设置法,或称为传动轴坐标系和驱动轴坐标

系,也有许多科研论文在应用该方法时并不特别加以区分,都称其为 D-H 法。

限于篇幅,应用下关节设置 D-H 方法的步骤在此不作说明,请参看文献 [17][18][20]。得到的变换矩阵:

$${}^{i-1}T = Rot(X, \alpha_{i-1})Trans(X, a_{i-1})Rot(Z, \theta_i)Trans(Z, d_i)$$

$$= \begin{bmatrix} c_i & -s_i & 0 & a_{i-1} \\ s_i c \alpha_{i-1} & c_i c \alpha_{i-1} & -s \alpha_{i-1} & -d_i s \alpha_{i-1} \\ s_i s \alpha_{i-1} & c_i s \alpha_{i-1} & c \alpha_{i-1} & d_i c \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

其中, $c_i = \cos \theta_i$, $s_i = \sin \theta_i$, $c \alpha_i = \cos \alpha_i$, $s \alpha_i = \sin \alpha_i$ 。

3.3 运动学正解

机器人操作臂运动学研究的是手臂各连杆之间的位移关系、速度关系和加速度关系。

3.3.1 D-H 参数表及各连杆变换矩阵

按照下关节设置的 D-H 法,如图 3.1 所示建立教学机器人的坐标系,列写各连杆参数见表 3.1。

表 3.1 D-H 参数表

连杆 序号 i	a_{i-1}	α_{i-1}	θ_i	d_i	关节变量范围
	mm	($^\circ$)	($^\circ$)	mm	($^\circ$)
1	$a_0=0$	$\alpha_0=0$	$\theta_1(0)$	$d_1=0$	-170—170
2	$a_1=120$	$\alpha_1=-90$	$\theta_2(-90)$	$d_2=0$	-135—45
3	$a_2=220$	$\alpha_2=0$	$\theta_3(0)$	$d_3=0$	-90—60
4	$a_3=80$	$\alpha_3=-90$	$\theta_4(0)$	$d_4=202$	-180—+180
5	$a_4=0$	$\alpha_4=90$	$\theta_5(0)$	$d_5=0$	-135—135
6	$a_5=0$	$\alpha_5=-90$	$\theta_6(0)$	$d_6=0$	-180—180

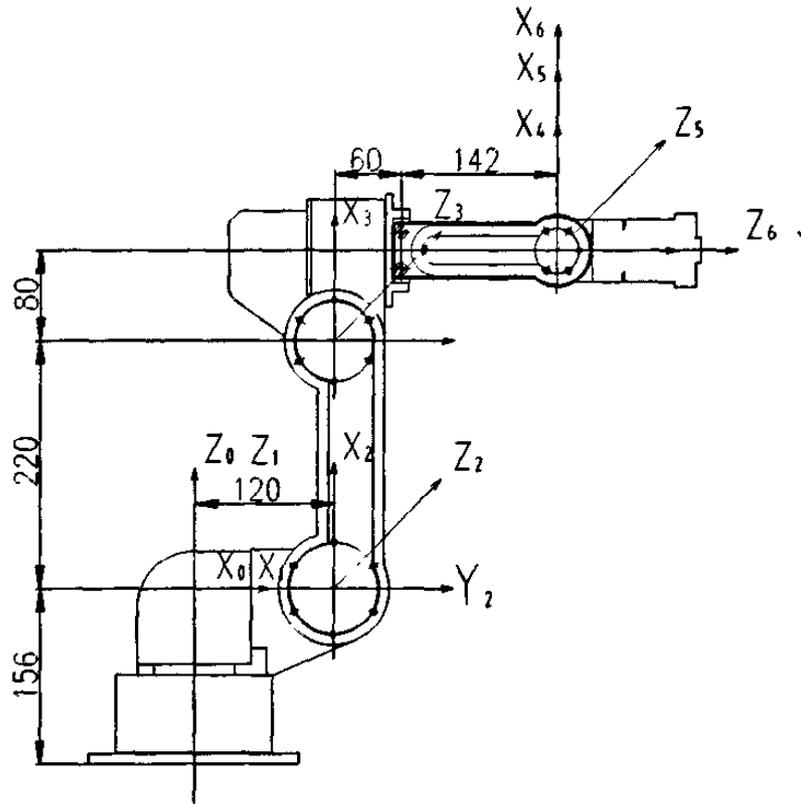


图 3.1 坐标系的建立

3.3.2 位置正分析

按照表 3.1 列出的各连杆参数，各连杆变换式见式 (3-2) 至 (3-7)。

$${}^0_1T = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & 0 \\ s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

$${}^1_2T = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s_2 & -c_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

$${}^2_3T = \begin{bmatrix} c_3 & -s_3 & 0 & a_2 \\ s_3 & c_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

$${}^3_4T = \begin{bmatrix} c_4 & -s_4 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ -s_4 & -c_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

$${}^4_5T = \begin{bmatrix} c_5 & -s_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ s_5 & c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

$${}^5_6T = \begin{bmatrix} c_6 & -s_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s_6 & -c_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

将以上各个连杆变换矩阵相乘,就得到了机械手的变换矩阵 0_6T :

$${}^0_6T = {}^0_1T {}^1_2T {}^2_3T {}^3_4T {}^4_5T {}^5_6T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

其中:

$$\begin{aligned} n_x &= [(c_1*c_2*c_3 - c_1*s_2*s_3)*c_4 + s_1*s_4]*c_5 \\ &\quad - (c_1*c_2*s_3 + c_1*s_2*c_3)*s_5]*c_6 \\ &\quad - [(c_1*c_2*c_3 - c_1*s_2*s_3)*s_4 - s_1*c_4]*s_6 \\ n_y &= [(s_1*c_2*c_3 - s_1*s_2*s_3)*c_4 - c_1*s_4]*c_5 - (s_1*c_2*s_3 + s_1*s_2*c_3)*s_5 \\ &\quad *c_6 - [(s_1*c_2*c_3 - s_1*s_2*s_3)*s_4 + c_1*c_4]*s_6 \\ n_z &= [-(s_2*c_3 + c_2*s_3)*c_4*c_5 + (s_2*s_3 - c_2*c_3)*s_5]*c_6 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+(s_2*c_3+c_2*s_3)*s_4*s_6 \\
 o_x = &-\{[(c_1*c_2*c_3-c_1*s_2*s_3)*c_4+s_1*s_4]*c_5 \\
 &-(c_1*c_2*s_3+c_1*s_2*c_3)*s_5\}*s_6 \\
 &-[(c_1*c_2*c_3-c_1*s_2*s_3)*s_4-s_1*c_4]*c_6 \\
 o_y = &-\{[(s_1*c_2*c_3-s_1*s_2*s_3)*c_4-c_1*s_4]*c_5 \\
 &-(s_1*c_2*s_3+s_1*s_2*c_3)*s_5\}*s_6-[(s_1*c_2*c_3-s_1*s_2*s_3)*s_4 \\
 &+c_1*c_4]*c_6 \\
 o_z = &[(s_2*c_3+c_2*s_3)*c_4*c_5-(s_2*s_3-c_2*c_3)*s_5]*s_6 \\
 &+(s_2*c_3+c_2*s_3)*s_4*c_6 \\
 a_x = &-[(c_1*c_2*c_3-c_1*s_2*s_3)*c_4+s_1*s_4]*s_5+(-c_1*c_2*s_3-c_1*s_2*c_3)*c_5 \\
 a_y = &-[(s_1*c_2*c_3-s_1*s_2*s_3)*c_4-c_1*s_4]*s_5+(-s_1*c_2*s_3-s_1*s_2*c_3)*c_5 \\
 a_z = &-(-s_2*c_3-c_2*s_3)*c_4*s_5+(s_2*s_3-c_2*c_3)*c_5 \\
 p_x = &a_3*c_1*c_2*c_3-a_3*c_1*s_2*s_3-d_4*c_1*c_2*s_3-200*c_1*s_2*c_3 \\
 &+a_2*c_1*c_2+a_1*c_1 \\
 p_y = &a_3*s_1*c_2*c_3-a_3*s_1*s_2*s_3-d_4*s_1*c_2*s_3-a_2*s_1*s_2*c_3 \\
 &+a_2*s_1*c_2+a_1*s_1 \\
 p_z = &-a_3*s_2*c_3-a_3*c_2*s_3+d_4*s_2*s_3-d_4*c_2*c_3-a_2*s_2
 \end{aligned}$$

各式用 MATLAB 软件符号运算工具箱算得并经手工计算检验， $s_1=\sin\theta_1$ ， $c_1=\cos\theta_1$ ，其余类似。

3.3.3 速度正分析——雅可比矩阵

所谓机器人的速度问题，是在已知机器人关节位置 q 的情况下，研究机器人的关节速度 \dot{q} 与其手端运动速度间的关系问题。常用雅可比矩阵来描述操作空间与关节空间速度之间的线性映射关系。

机器人操作臂的操作速度与关节速度的线性变换定义为机器人操作臂的雅可比矩阵，可视它为从关节空间向操作空间运动速度的传动比。

令操作臂的运动方程为：

$$x = x(q) \tag{3-9}$$

式(3-9)代表操作空间 x 与关节空间 q 之间的位移关系。将式(3-9)两边对时间 t 求导, 即得出 x 与 q 之间的微分关系

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad (3-10)$$

式中, \dot{x} 称为末端在操作空间的广义速度, 简称操作速度; \dot{q} 为关节速度; $J(q)$ 是 $6 \times n$ 的偏导数矩阵, 称为操作臂的雅可比矩阵。有多种求解雅可比矩阵的方法, 最常用的是构造法。限于篇幅, 此处不介绍构造法求解雅可比矩阵的原理, 仅说明利用构造法求解的步骤, 如有必要, 请参阅文献[17]、[18]。

- (1) 计算各连杆变换 ${}^0T_1, {}^1T_2, \dots, {}^{n-1}T_n$ 。
- (2) 计算各连杆至末端连杆的变换(${}^0T_n, {}^1T_n, \dots, {}^{n-1}T_n$)。
- (3) 计算 $J(q)$ 的各列元素, 第 i 列 ${}^T J_i$ 由 ${}^i T$ 决定。根据公式(3-11)计算 ${}^T J_u$ 和 ${}^T J_d$ 。

$$\left. \begin{aligned} {}^T J_u &= \begin{bmatrix} (p \times n)_z \\ (p \times o)_z \\ (p \times a)_z \end{bmatrix} \text{(转动关节)} & {}^T J_u &= \begin{bmatrix} n_z \\ o_z \\ a_z \end{bmatrix} \text{(移动关节 } i) \\ {}^T J_d &= \begin{bmatrix} n_z \\ o_z \\ a_z \end{bmatrix} \text{(转动关节 } i) & {}^T J_d &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{(移动关节 } i) \end{aligned} \right\} \quad (3-11)$$

以下推导雅可比矩阵:

$${}^4T = {}^4T_5 {}^5T_6 = \begin{bmatrix} c_5 c_6 & -c_5 s_6 & -s_5 & 0 \\ s_6 & c_6 & 0 & 0 \\ s_5 c_6 & -s_5 s_6 & c_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

$${}^3T = {}^3T_4 {}^4T = \begin{bmatrix} c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6 & -c_4 c_5 s_6 - s_4 c_6 & -c_4 s_5 & a_3 \\ s_5 c_6 & -s_5 s_6 & c_5 & d_4 \\ -s_4 c_5 c_6 - c_4 s_6 & s_4 c_5 s_6 - c_4 c_6 & s_4 s_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

$${}^2T = {}^2T {}^3T = \begin{bmatrix} c_3(c_4c_5c_6 - s_4s_6) & -c_3(c_4c_5s_6 + s_4c_6) & -c_3c_4s_5 & a_3c_3 \\ -s_3s_5c_6 & +s_3s_5s_6 & -s_3c_5 & -d_4s_3 \\ s_3(c_4c_5c_6 - s_4s_6) & -s_3(c_4c_5s_6 + s_4c_6) & -s_3c_4s_5 & a_3s_3 + d_4c_3 \\ +c_3s_5c_6 & -c_3s_5s_6 & +c_3c_5 & \\ -s_4c_5c_6 - c_4s_6 & s_4c_5s_6 - c_4c_6 & s_4s_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

$${}^1T = {}^1T {}^2T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-15)$$

其中:

$$\begin{aligned}
 n_x &= c_2[c_3(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_3s_5c_6] - s_2[s_3(c_4c_5c_6 - s_4s_6) + c_3s_5c_6] \\
 o_x &= c_2[-c_3(c_4c_5s_6 + s_4c_6) + s_3s_5s_6] + s_2[s_3(c_4c_5s_6 + s_4c_6) + c_3s_5s_6] \\
 a_x &= -c_2c_3c_4s_5 - c_2s_3c_5 + s_2s_3c_4s_5 - s_2c_3c_5 \\
 p_x &= c_2(a_3c_3 - d_4s_3 + a_2) - s_2(a_3s_3 + d_4c_3) + a_1 \\
 n_y &= -s_4c_5c_6 - c_4s_6 \\
 o_y &= s_4c_5s_6 - c_4c_6 \\
 a_y &= s_4s_5 \\
 p_y &= 0 \\
 n_z &= -s_2[c_3(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_3s_5c_6] - c_2[s_3(c_4c_5c_6 - s_4s_6) + c_3s_5c_6] \\
 o_z &= s_2[c_3(c_4c_5s_6 + s_4c_6) - s_3s_5s_6] + c_2[s_3(c_4c_5s_6 + s_4c_6) + c_3s_5s_6] \\
 a_z &= s_2(c_3c_4s_5 + s_3c_5) + c_2(s_3c_4s_5 - c_3c_5) \\
 p_z &= -s_2(a_3c_3 - d_4s_3 + a_2) - c_2(a_3s_3 + d_4c_3)
 \end{aligned}$$

0T 在前面计算正解时已经得出, 见式 (3-8)。

${}^T J(q)$ 第一列 ${}^T J_1(q)$ 对应的变换矩阵是 1T , 式(3-15)列出了 1T 的各元素, 由式

(3-11)得:

$${}^T J_1(q) = \begin{bmatrix} {}^T J_{1x} \\ {}^T J_{1y} \\ {}^T J_{1z} \\ -s_2[c_3(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_3s_5c_6] - c_2[s_3(c_4c_5c_6 - s_4s_6) + c_3s_5] \\ s_2[c_3(c_4c_5s_6 + s_4c_6) - s_3s_5s_6] + c_2[s_3(c_4c_5s_6 + s_4c_6) + c_3s_5] \\ s_2(c_3c_4s_5 + s_3c_5) + c_2(s_3c_4s_5 - c_3c_5) \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

式中:

$${}^T J_{1x} = [c_2(a_3c_3 - d_4s_3 + a_2) - s_2(a_3s_3 + d_4c_3) + a_1] [-s_4c_5c_6 - c_4s_6]$$

$${}^T J_{1y} = [c_2(a_3c_3 - d_4s_3 + a_2) - s_2(a_3s_3 + d_4c_3) + a_1] (s_4c_5s_6 - c_4c_6)$$

$${}^T J_{1z} = [c_2(a_3c_3 - d_4s_3 + a_2) - s_2(a_3s_3 + d_4c_3) + a_1] s_4s_5$$

同理, 利用变换矩阵 2T 得出 ${}^T J(q)$ 的第二列:

$${}^T J_2(q) = \begin{bmatrix} {}^T J_{2x} \\ {}^T J_{2y} \\ {}^T J_{2z} \\ -s_4c_5c_6 - c_4s_6 \\ s_4c_5s_6 - c_4c_6 \\ s_4s_5 \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

式中,

$${}^T J_{2x} = (a_3c_3 - d_4s_3 + a_2)(s_4c_5c_6 + c_4s_6)$$

$$- (a_3s_3 + d_4c_3)[c_3(c_4c_5c_6 - s_4s_6) - s_3s_5c_6]$$

$${}^T J_{2y} = (a_3c_3 - d_4s_3 + a_2) [-s_3(c_4c_5s_6 + s_4s_6) - c_3s_5s_6]$$

$$- (a_3s_3 + d_4c_3) [-c_3(c_4c_5s_6 + s_4c_6) + s_3s_5s_6]$$

$${}^T J_{2z} = (a_3c_3 - d_4s_3 + a_2) (-s_3c_4s_5 + c_3c_5) - (a_3s_3 + d_4c_3) (-c_3c_4s_5 - s_3c_5)$$

同理, 利用变换矩阵 3T 得出 ${}^T J(q)$ 的第三列:

$${}^T J_3(q) = \begin{bmatrix} a_3 s_5 c_6 - d_4 (c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) \\ -a_3 s_5 s_6 + d_4 c_4 c_5 s_6 \\ a_3 c_5 + d_4 c_4 s_5 \\ -s_4 c_5 c_6 - c_4 s_6 \\ s_4 c_5 s_6 - c_4 c_6 \\ s_4 s_5 \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

同理,

$${}^T J_4(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ s_5 c_6 \\ -s_5 s_6 \\ c_5 \end{bmatrix} \quad {}^T J_5(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -s_6 \\ -c_6 \\ 0 \end{bmatrix} \quad {}^T J_6(q) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$${}^T J(q) = [{}^T J_1(q), {}^T J_2(q), {}^T J_3(q), {}^T J_4(q), {}^T J_5(q), {}^T J_6(q)]$$

3.4 运动学逆解

3.4.1 运动学逆解的一般性问题

运动学正解相对比较容易, 只要根据运动学模型, 通过变换矩阵就可以求得末端在基坐标下的唯一坐标值。

运动学逆解是在已知手部(末端)空间位姿的情况下, 求解出关节变量, 是对机器人进行有效控制所必须的。然而, 运动学逆解的求解要比正解求解复杂得多, 主要有以下问题:

1、可解性: 求解操作臂运动学方程是一个非线性问题。已知 ${}^0_N T$ 的数值, 试图求出 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ 。通常这种方程为非线性超越方程, 特别是当 α_i 不是0或 ± 90 度时, 方程非常复杂, 很难求解。

2、解的存在性: 解是否存在的问题完全取决于操作臂的工作空间。简单的说, 工作空间是操作臂末端执行器所能到达的范围。

3、多重解问题：在求解运动学方程时可能遇到的另一个问题就是多重解问题。在实际情况下，经常会出现机械臂可以有几个位形到达指定的位姿，即有几个解，而控制系统只能选择其中的一个解来处理，这里面涉及到一个选择标准问题。

由于机器人逆运动问题本身的复杂性，要建立通用算法是相当困难的，许多人为此付出巨大的努力，做了大量的工作。有关机器人运动学逆解的求解方法很多，其中主要有解析法^[26-27]、几何法^[28]、符号及数值方法^[29]、几何-解析法等^[30]。以下采用代数法（解析法）求解教学机器人的逆解。

3.4.2 逆运动学方程的推导和求解

$${}^2T_4{}^3T_4{}^4T_5 = \begin{bmatrix} c_3c_4c_5 - s_3s_5 & -c_3c_4s_5 - s_3c_5 & c_3s_4 & a_3c_3 - d_4s_3 + a_2 \\ s_3c_4c_5 + c_3s_5 & -s_3c_4s_5 + c_3c_5 & s_3s_4 & a_3s_3 + d_4c_3 \\ -s_4c_5 & s_4s_5 & c_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

$$\text{又因为: } {}^2T_4{}^3T_4{}^4T_5 = ({}^1T_2)^{-1}({}^0T_1)^{-1}{}^0T_6({}^5T_6)^{-1}$$

$$= \begin{bmatrix} c_1c_2(c_6n_x - s_6o_x) & c_1c_2a_x & c_1c_2(-s_6n_x - c_6o_x) & c_1c_2p_x \\ +s_1c_2(c_6n_y - s_6o_y) & +s_1c_2a_y & +s_1c_2(-s_6n_y - c_6o_y) & +s_1c_2p_y \\ -s_2(c_6n_z - s_6o_z) & -s_2a_z & -s_2(-s_6n_z - c_6o_z) & -s_2p_z - a_1c_2 \\ -c_1s_2(c_6n_x - s_6o_x) & -c_1s_2a_x & -c_1s_2(-s_6n_x - c_6o_x) & -c_1s_2p_x \\ -s_1s_2(c_6n_y - s_6o_y) & -s_1s_2a_y & -s_1s_2(-s_6n_y - c_6o_y) & -s_1s_2p_y \\ -c_2(c_6n_z - s_6o_z) & -c_2a_z & -c_2(-s_6n_z - c_6o_z) & -c_2p_z + a_1s_2 \\ -s_1(c_6n_x - s_6o_x) & -s_1a_x & -s_1(-s_6n_x - c_6o_x) & -s_1p_x \\ +c_1(c_6n_y - s_6o_y) & +c_1a_y & +c_1(-s_6n_y - c_6o_y) & +c_1p_y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-20)$$

1、求解 θ_1

考虑式(3-19)和式(3-20)对应元素(3,4)相等, 得:

$$-s_1 p_x + c_1 p_y = 0$$

则 $\theta_1 = \text{Atan2}(p_y, p_x)$ 或 $\theta_1 = \text{Atan2}(-p_y, -p_x)$

2、求解 θ_2

考虑式(3-19)和式(3-20)对应元素(1,4)和(2,4)相等, 得:

$$a_3 c_3 - d_4 s_3 + a_2 = c_1 c_2 p_x + s_1 c_2 p_y - s_2 p_z - a_1 c_2 \quad (3-21)$$

$$a_3 s_3 + d_4 c_3 = -c_1 s_2 p_x - s_1 s_2 p_y - c_2 p_z + a_1 s_2 \quad (3-22)$$

取中间变量 u, v, m, h , 且令:

$$u = c_1 p_x + s_1 p_y - a_1$$

$$v = p_z$$

则(3-21)和(3-22)可写为:

$$a_3 c_3 - d_4 s_3 = c_2 u - s_2 v - a_2 \quad (3-23)$$

$$a_3 s_3 + d_4 c_3 = -s_2 u - c_2 v \quad (3-24)$$

(3-23)和(3-24)两端分别平方, 然后相加可消去 s_3, c_3 , 得

$$a_3^2 + d_4^2 = u^2 + v^2 + 2a_2 c_2 u - 2a_2 s_2 v$$

$$\text{即: } \frac{a_3^2 + d_4^2 - u^2 - v^2}{2a_2} = c_2 u - s_2 v$$

$$\text{令: } m = \frac{a_3^2 + d_4^2 - u^2 - v^2}{2a_2}$$

$$\theta_2 = \text{Atan2}(-v, u) \pm \text{Atan2}(\sqrt{v^2 + u^2 - m^2}, m)$$

3、求解 θ_3

$$a_3 c_3 - d_4 s_3 + a_2 = c_2 u - s_2 v \quad (3-25)$$

$$a_3 s_3 + d_4 c_3 = -s_2 u - c_2 v \quad (3-26)$$

(3-25)和(3-26)两端分别平方, 然后相加可消去 s_2, c_2 , 得

$$a_3^2 + d_4^2 + 2a_2(a_3 c_3 - d_4 s_3) = u^2 + v^2,$$

$$\text{即 } a_3 c_3 - d_4 s_3 = -\frac{a_3^2 + d_4^2 - u^2 - v^2}{2a_2 \sqrt{a_3^2 + d_4^2}},$$

$$\text{令 } h = -\frac{a_3^2 + d_4^2 - u^2 - v^2}{2a_2\sqrt{a_3^2 + d_4^2}}$$

$$\text{则 } \theta_3 = \text{Atan2}(-d_4, a_3) \pm \text{Atan2}(\sqrt{d_4^2 + a_3^2 - h^2}, h)$$

4、在求得 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 的情况下, 求 θ_5

考虑式(3-19)和式(3-20)对应元素(2,2)和(2,1)相等, 得:

$$-s_3c_4s_5 + c_3c_5 = -c_1s_2a_x - s_1s_2a_y - c_2a_z \quad (3-27)$$

$$-c_3c_4s_5 - s_3c_5 = c_1c_2a_x + s_1c_2a_y - s_2a_z \quad (3-28)$$

式(3-27)两边同乘 c_3 和式(3-28)左右两边同乘 s_3 , 再两式相减, 得

$$c_5 = (-c_1s_2a_x - s_1s_2a_y - c_2a_z)c_3 - (c_1c_2a_x + s_1c_2a_y - s_2a_z)s_3$$

考虑 θ_5 的范围: $-135^\circ < \theta_5 < 135^\circ$

若 $\theta_5 \in (-135^\circ, 0^\circ]$,

$$\theta_5 = -\arccos[(-c_1s_2a_x - s_1s_2a_y - c_2a_z)c_3 - (c_1c_2a_x + s_1c_2a_y - s_2a_z)s_3]$$

若 $\theta_5 \in (0^\circ, 135^\circ]$,

$$\theta_5 = \arccos[(-c_1s_2a_x - s_1s_2a_y - c_2a_z)c_3 - (c_1c_2a_x + s_1c_2a_y - s_2a_z)s_3]$$

5、求解 θ_4

此时 θ_5 已知, 由式(3-28)得:

$$c_4 = (c_1c_2a_x + s_1c_2a_y - s_2a_z + s_3c_5) / (-c_3s_5)$$

考虑 θ_4 的范围: $-180^\circ < \theta_4 < 180^\circ$

若 $\theta_4 \in (-180^\circ, 0^\circ]$

$$\theta_4 = -\arccos\left[\frac{c_1c_2a_x + s_1c_2a_y - s_2a_z + s_3c_5}{-c_3s_5}\right]$$

若 $\theta_4 \in (0^\circ, 180^\circ]$

$$\theta_4 = \arccos\left[\frac{c_1c_2a_x + s_1c_2a_y - s_2a_z + s_3c_5}{-c_3s_5}\right]$$

6、求解 θ_6

此时 θ_4 已知, 考虑式(3-19)和式(3-20)对应元素(3,3)相等, 得:

$$c_4 = -s_1(-s_6n_x - c_6o_x) + c_1(-s_6n_y - c_6o_y)$$

写成 $s_6(s_1n_x - c_1n_y) + c_6(s_1o_x - c_1o_y) = c_4$

$\theta_6 = \text{Atan2}(s_1n_x - c_1n_y, s_1o_x - c_1o_y) \pm$

$$\text{Atan2}(\sqrt{(s_1n_x - c_1n_y)^2 + (s_1o_x - c_1o_y)^2 + c_4^2}, c_4)$$

至此，求出了全部的 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ 。

上述求解过程用到了双变量反正切函数 $\text{Atan2}(y, x)$ ，它表示从 x 轴到过原点 $(0, 0)$ 和坐标点 (x, y) 的直线的夹角。该夹角以弧度表示，介于 $-\pi$ 和 π 之间。

求解过程还用到了以下公式^[19]：

若 $a \cos \theta + b \sin \theta = 0$ ，则 $\theta = \text{Atan2}(a, -b)$ 或 $\text{Atan2}(-a, b)$ ；

若 $\begin{cases} a \cos \theta - b \sin \theta = c \\ a \sin \theta + b \cos \theta = d \end{cases}$ ，则 $\theta = \text{Atan2}(ad - bc, ac + bd)$ ；

若 $a \cos \theta + b \sin \theta = c$ ，则 $\theta = \text{Atan2}(b, a) \pm \text{Atan2}(\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}, c)$ 。

从上述的求解过程可知，机器人的逆解存在多组解，具体哪些解是可行的可以通过程序来判定。而在某一特定条件下具体取哪个可行解，可以使用一个目标优化函数来判定。

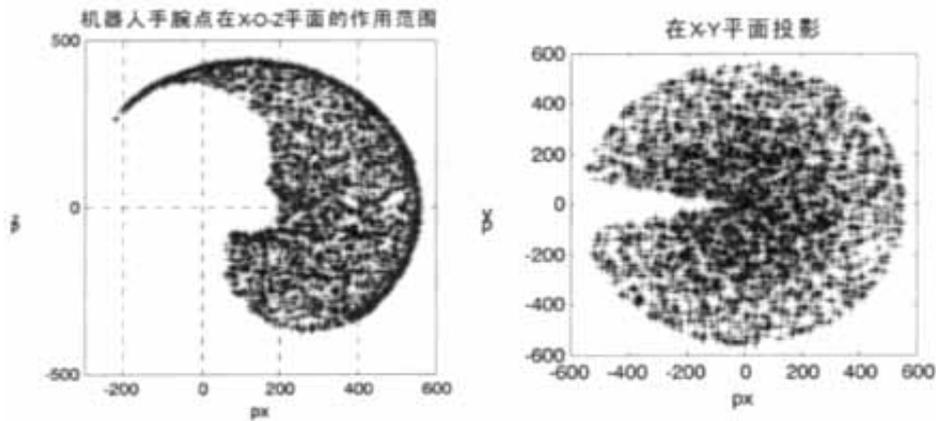
3.5 模型的通用化讨论

从建立的坐标系情况可以看出，第 0 号坐标系与第 1 号坐标系重合，第 6 关节的坐标系建立在手腕上。在实际应用当中，由于不同的使用条件，机器人的安装位置通常也不同，而且所安装的工具也各不相同，这时所推导的运动学解方程以及逆解方程不能直接应用。此时，应视具体情况，在 0T 前再乘以一个齐次变换阵 0T ，在 6T 后再乘以一个齐次变换阵 6T ，很显然，针对某一具体的应用场合， 0T 和 6T 都是常数矩阵。其逆矩阵也是常数矩阵，而且这些常数矩阵是可以通过测量、标定或其他手段得到具体数值的。

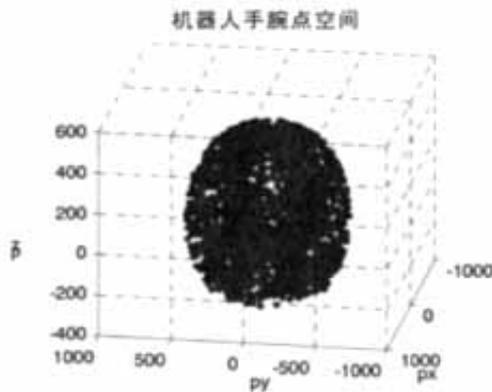
那么，对于新的情况下，对于正解问题，只要在(3-8)式的结果上再做变换 ${}^i T = {}^0 T {}^0 T {}^6 T$ ，就可以得到从工具坐标系到指定的固定坐标系的变换矩阵。而对于逆解问题，这时 ${}^i T$ 是已知的，通过变换 ${}^0 T = ({}^i T)^{-1} {}^i T ({}^6 T)^{-1}$ ，则将实际

使用的坐标系中所期望的位姿转换到前面所推导的坐标系中，这样，以上逆解求解方法就能适应工具的变化。

3.6 工作空间分析



(a) 在 X-0-Y 平面内的工作空间 (b) 工作空间在 X-0-Y 平面投影



(c) 工作空间三维图

图 3.2 机器人手腕点工作空间分析图

在安装机器人以及对工作场所进行布置时，需要确切而形象的把握机器人的工作空间，式(3-8)的第 4 列元素表示了机器人第 6 关节坐标原点在空间的坐标： $[p_x, p_y, p_z, 1]$ ，而最终的工具坐标原点实际上是固连在第 6 关节坐标系的。当 0T 乘以一个常数矩阵 6T 后， $[p_x, p_y, p_z]$ 与 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6$ 都有关，要绘制其工作空间会变得困难得多，而且直观性也不好。实际上，不失一般性，工具坐标工作空间可以分两部分来考虑，先求得第 4 关节坐标原点（腕部坐标原点）的工作空间后，再对此空间作一个以腕部坐标原点到

工具坐标原点的距离为半径的球面包络，即为最后机器人的工作空间。以下分析机器人腕部坐标原点的工作空间。

矢量 $[p_x, p_y, p_z]$ 就是第 6 关节坐标原点的轨迹点，实际上从建立的坐标系情况可以看出， 0T 的 $[p_x^4, p_y^4, p_z^4]$ 与 0T 的 $[p_x^6, p_y^6, p_z^6]$ 是相同的。我们可以按照如下方式来考虑第 4 关节坐标原点的工作空间。首先，第一关节不动，取为 0° ，那么，其工作空间就被限制在一个平面内， θ_2 和 θ_3 的变化使得 $[p_x^4, p_y^4, p_z^4]$ 在平面内运动，运用 MATLAB 软件可以方便的绘出其图像；然后，将该工作空间绕 z_1 轴旋转，就得到了第 4 关节坐标原点在三维空间的工作空间。图 3.2 (a) 是在 MATLAB 软件环境下，绘得的在 X-0-Z 平面内的工作空间。图 3.2 (b) 是手腕工作空间在 X-Y 平面的投影。图 3.2 (c) 是手腕工作空间的三维图，在软件环境下，通过调整视角可以直观的看到手腕的工作空间。

3.7 误差分析

影响机器人位姿精度的因素非常多，包括：(1) 机器人结构参数和运动变量误差，由于制造及装配的误差使机器人的实际参数($\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i$)与其名义值之间产生偏差，从而引起机器人位姿误差。(2) 环境因素，如工作环境温度的变化及长时间的磨损等都会导致机器人连杆的长度尺寸产生误差，从而引起机器人位姿误差。(3) 关节误差(包括固有误差以及运动副磨损引起的关节转角误差)、位置传感器误差(包括标定误差)、控制系统的误差(包括和编程方法及控制算法有关的误差、计算误差)等。此外，还有由外力、惯性力、自重等引起的连杆和关节的弹性变形及振动带来的动态误差。整个机器人的误差分析是一个非常复杂的问题。这里结合本教学机器人的设计，仅对机器人结构参数和运动变量误差引起的位置误差进行分析。

3.7.1 传感器和减速器因素引起的位置误差

本文的第 2 章 2.4.2 中确定了增量式编码器直接安装在电机高速端的检测方式。关节角度误差=编码器分辨率/减速比+减速器精度，所选的传感器每转

能提供 1000 个脉冲，即分辨率达 0.36 度，当采用二分频或四分频时分辨率更高，各关节的减速比都较大，均大于 100: 1。由此可见编码器误差对关节转角总误差的贡献在 0.0001~0.001 度这个量级，而减速器要做到 0.01 度（不足 1'）这个量级已很难，因而，这种检测方式下，关节转角误差主要取决于减速器的精度而可以忽略传感器误差。

前面的 3.3.2 节已经求得了末端位置的表达式，它是关于 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 的函数 $p_x(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ （以 x 轴为例），当引入关节转角误差时位置可表示为 $p_x(\theta_1 + \Delta\theta_1, \theta_2 + \Delta\theta_2, \theta_3 + \Delta\theta_3)$ 。

x 方向的误差可表示为：

$$\Delta p_x = p_x(\theta_1 + \Delta\theta_1, \theta_2 + \Delta\theta_2, \theta_3 + \Delta\theta_3) - p_x(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$$

y 方向和 z 方向误差可用同样的方法分析，总位置误差：

$$\Delta p = \sqrt{\Delta p_x^2 + \Delta p_y^2 + \Delta p_z^2}$$

按每个关节减速器误差 9'，用 MATLAB 软件分析其误差如图 3.3 所示。

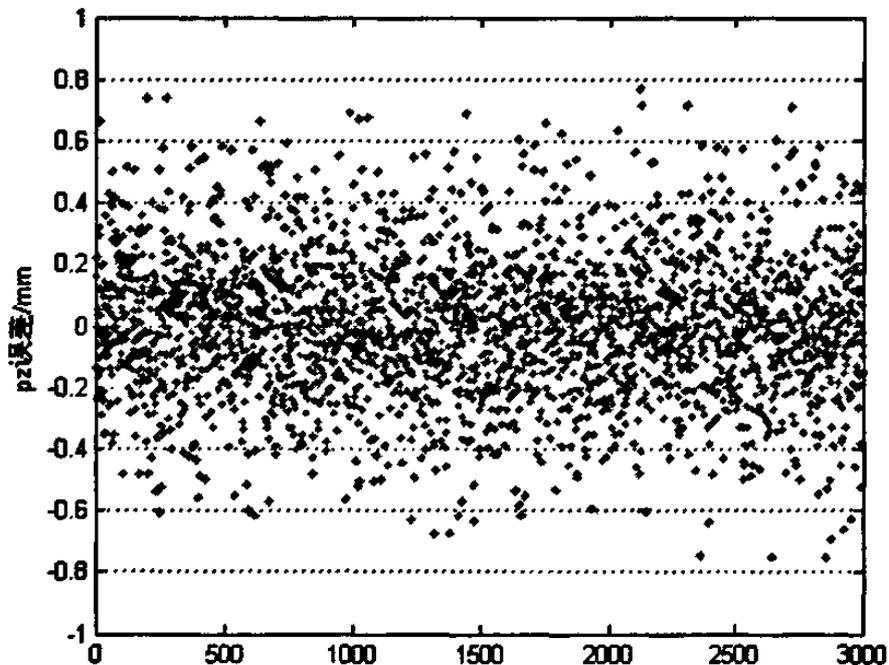


图 3.3 关节转角引起的 p_z 误差

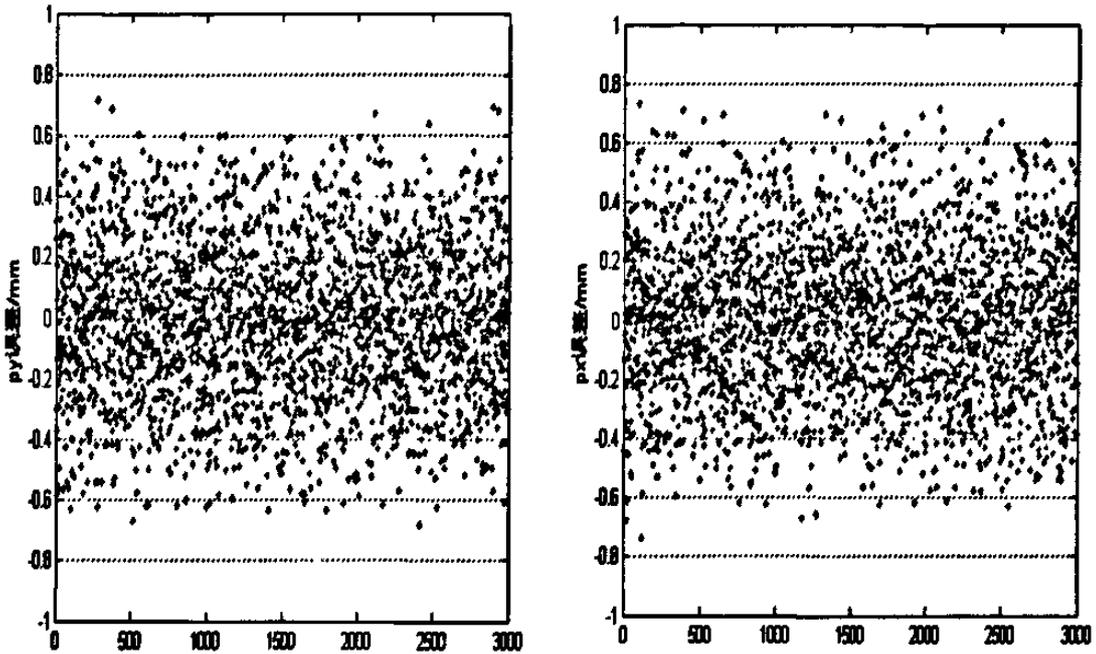


图 3.4 关节转角引起的 p_y 和 p_x 误差

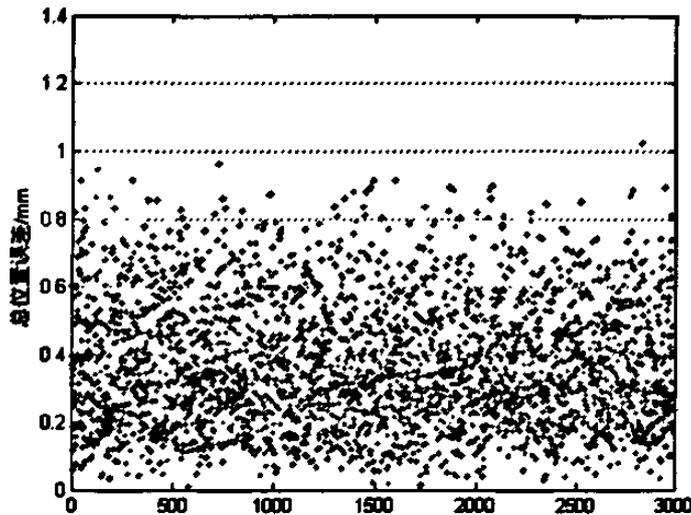


图 3.5 关节转角引起的总位置误差

在不同位姿下，关节转角误差引起的机器人末端位置误差是不同的。因为机器人并非总是处于对精度最不利的位姿，而且减速器也不可能总是以最大误差来传递运动，如果仅以极限的情况来分析，并不能全面而真实的反应机器人工作时的精度。这里采用随机统计的办法来分析，使机器人的关节角位置在转角范围内取随机值(随机均匀分布)，减速器误差也在误差范围内取随机值，整个仿真取了 3000 个随机点，这样得到了上面的图 3.3、图 3.4、图 3.5，从图中可以看出，单方向的误差集中在 $\pm 0.8\text{mm}$ 之间，传感器和减速器

因素引起的总的位置误差集中在 1mm 的范围内。

3.7.2 臂板加工误差引起的位置误差

在加工制造时，臂板长度不可能与理论设计值完全一致，1-2 关节轴线距离(a_1)公差为 $\pm 0.2\text{mm}$ ，2-3 关节臂板在两关节轴线距离(a_2)的公差为 $\pm 0.2\text{mm}$ ，3-4 关节轴线距离(a_3)公差为 $\pm 0.1\text{mm}$ ，4-5 关节臂板公差(影响 d_4)为 $\pm 0.2\text{mm}$ ，运用 MATLAB 软件分析带来的末端位置误差如图 3.6 和图 3.7。

仍然采用取随机数(随机均匀分布)的办法来进行仿真，若取随机正态分布会更接近加工的实际，但是要排除那些不在公差允许范围内的情况(在加工中，若超过误差允许范围，零件要报废)会使程序变复杂。实际上，零件加工完成后，其误差是允许范围内的某一具体值，如果确实有必要，可以依据测量的结果在软件中修正这个误差，仿真反应的是在这种制造精度条件下不进行软件修正时的总体误差。从软件分析的结果来看，臂板制造误差引起的单方向位置误差集中在 $\pm 0.4\text{mm}$ 内，总误差集中在 0.5mm 以内。

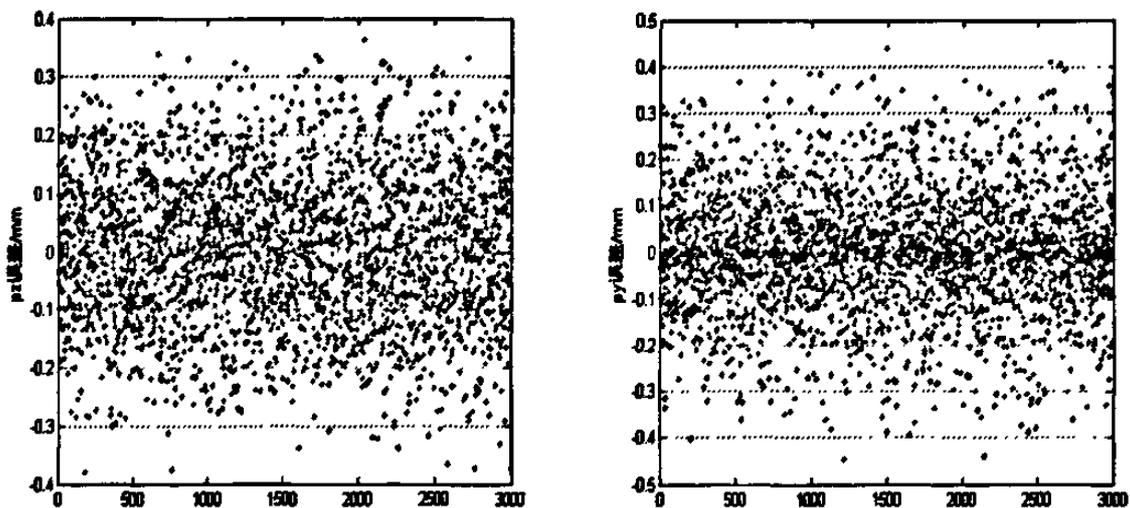


图 3.6 臂板制造误差引起的 p_z 和 p_y 误差分析

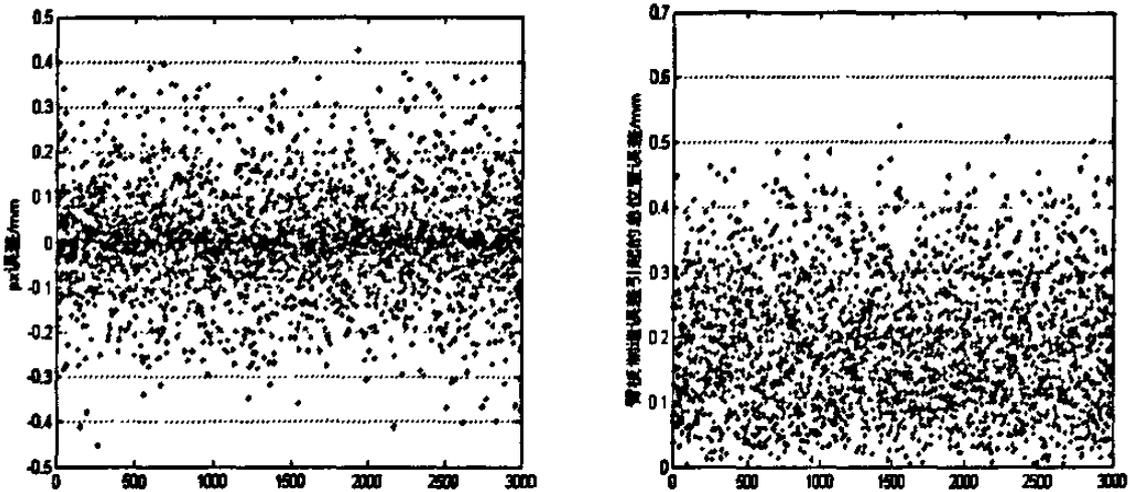


图 3.7 臂板制造误差引起的 p_x 和总位置误差分析

3.7.3 结构参数和运动变量误差引起的位置误差分析

前面已经分析了 D-H 参数中 θ 项、 d 项、 a 项所引起的误差， α 项误差主要源于关节轴线同心度误差，关节轴线同心度误差在加工时要求控制在 $\Phi 0.02$ 以内，此种情况下能够引起的 α 角度误差不足 0.0005 度，这样的精度与 θ 项相比完全是可以忽略的。因此，这里忽略 α 项引起的误差。结构参数和运动变量误差引起的位置误差分析如图 3.8、图 3.9 和图 3.10 所示。

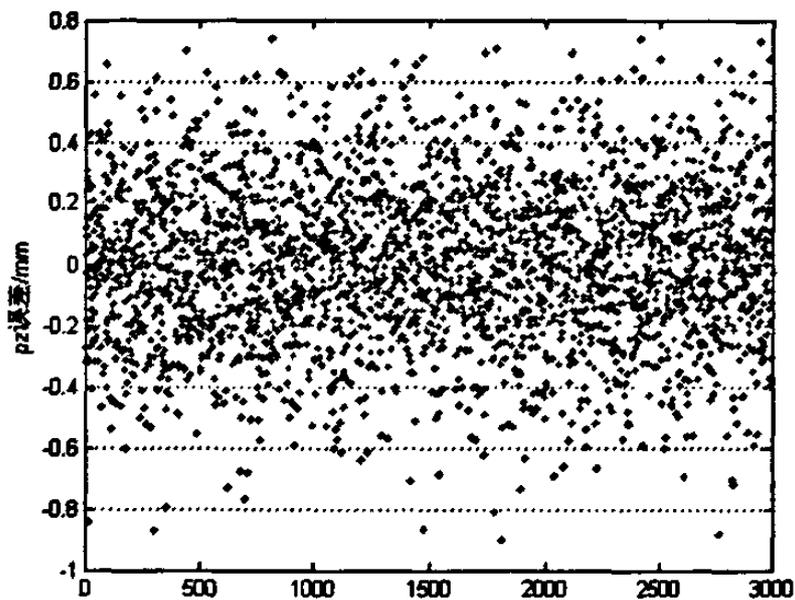


图 3.8 结构参数和运动变量误差引起的 p_z 误差

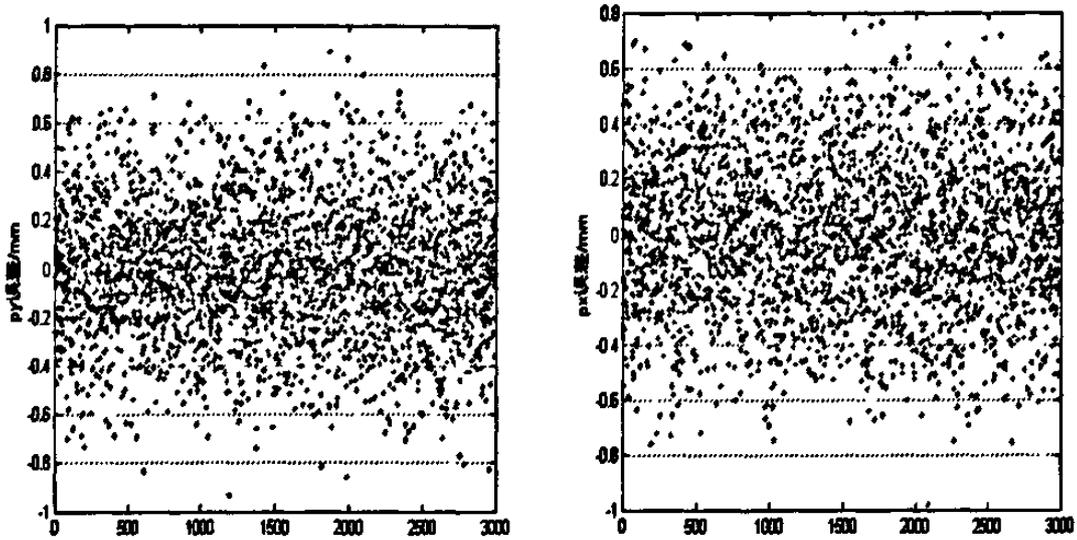


图 3.9 结构参数和运动变量误差 p_y 和 p_x 误差

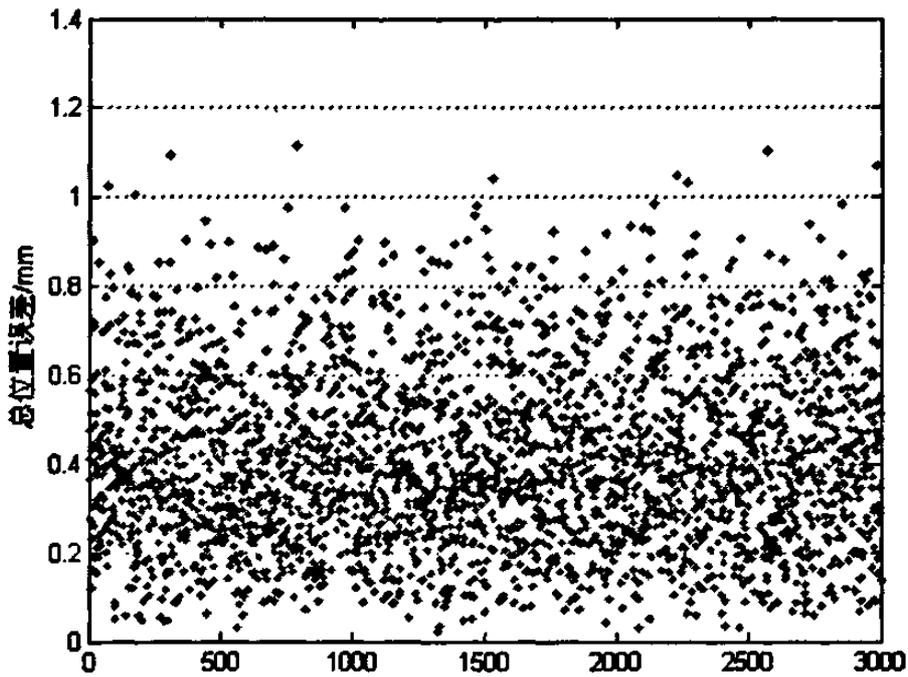


图 3.10 结构参数和运动变量误差引起总位置误差

从软件仿真的结果来看，单方向的位置误差基本上都在 $\pm 0.8\text{mm}$ 以内，总的位置误差在 1.1mm 以内，由此可以说明，实现第2章拟定的 5mm 定位精度是可能的。

3.8 本章小结

本章采用改进的 D-H 法（下关节设置）建立了六自由度教学机器人的数学模型，在此基础上，对其进行了位置正分析、速度正分析（雅可比矩阵），采用了一种代数逆解方法求得其逆解。并对工具的变换，采用不同基坐标的情况进行了分析，指出了使本章求解方法通用化的方法。仿真分析了机器人的工作空间，对传感器、谐波减速器误差以及加工制造误差引起的末端位置误差进行了仿真分析，指出实现拟定的定位精度是可能的。

第4章 六自由度教学机器人机械结构设计

4.1 引言

作为机器人系统中的重要组成部分，机器人本体不仅要承受被抓取物体的重量，而且还要承受末端执行器、腕部和手臂自身的重量。它的结构、工作范围、灵活性以及抓取重量大小(即臂力)和定位精度都将直接影响机器人的工作质量。随着各种新的复杂的工作任务对机器人系统精度和性能要求的提高，这势必对机器人的机械结构、质量、体积、位置和传动精度提出了更高的要求。为了保证机器人具有良好的动态性能，其结构设计时必须尽量减小惯量、提高刚度、减小摩擦和传动间隙等。为此，本章主要根据机器人系统对机器人本体的要求，对机器人本体结构进行设计。

4.2 各关节电机、减速器和传感器选型

4.2.1 各关节力矩估算

各关节的动力参数要求是各关节的驱动元件和传动件选型的重要依据。

由机器人动力学知识可知，完整的机器人动力学方程具有如下形式：

$$Q = M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q) \quad (4-1)$$

式中： q ——关节位置向量

\dot{q} ——关节速度向量

\ddot{q} ——关节加速度向量

M ——操作惯性张量

C ——与哥氏加速度和向心加速度有关的量

F ——与粘性摩擦和库仑摩擦有关的量，它还与关节转角位置有关

G ——惯性负载

Q ——关节广义力向量

在设计计算时，机器人的动力参数计算方法主要有两类：一是静力学方法，二是动力学方法。对于低速机械，其运动构件因惯性力而引起的动载荷不大，即式(4-1)中C项的影响很小，故可以忽略不计，同时忽略摩擦力的因素。这种不计动载荷而仅考虑静载荷的计算称为静力计算。对于高速机械，由于其动载荷很大，C项的影响很大，往往大大超过其它静载荷，因此不能忽略不计，且粘滞摩擦也须加以考虑，这种同时计及静载荷和动载荷的计算称为动力学计算^[42,43]。由于教学机器人的速度比较低，采用静力学方法计算其关节所受极限力矩，以此为依据选用驱动元件和传动件。

由第2章所确定的连杆参数构建的机器人模型如图4.1所示。为估算各关节所需力矩，假定各关节的重量集中在关节理论中心点，各连杆重量集中在连杆中间，且按设计的零件图纸估计各关节及关节连杆重量如表4.1。

表 4.1 关节和臂板重量估计

关节序号	2	2—3臂板	3	4	4—5臂板	5	6	负载
重量表示	m_2	m_2^i	m_3	m_4	m_4^i	m_5	m_6	m_7
估值(kg)	4.35	1.5	1.876	2.215	0.5	1.72	0.63	0.5

关节极限力矩由重力负载（包括设计的任务负载重量）和加速度负载组成。

$$T_j = \sum_{i=j}^7 m_i g l_{ij} + \sum_{i=j}^7 J_{ij} \varepsilon_j + \sum_{i=j}^7 m_i^i g l_{ij}^i + \sum_{i=j}^7 J_{ij}^i \varepsilon_j \quad (4-2)$$

式中：

m_i, m_i^i ——如表4.1定义；

l_{ij} ——极限位置时，第*i*关节质心所在的铅垂线距第*j*关节轴线的距离；

J_{ij} ——极限位置时，第*i*关节质量对第*j*关节轴线的转动惯量，

$J_{ij} = m_i r_{ij}^2$ ，其中 r_{ij} 第*i*关节质心到第*j*关节轴线的距离；

J_{ij}^i ——极限位置时，第*i*号臂板对第*j*关节轴线的转动惯量（当*i*≠2,4

时， J_{ij}^i 为0）， $J_{ij}^i = m_i^i r_{ij}^{i2}$ ，其中 r_{ij}^i 为第*i*号臂板到第*j*关节轴线的距离；

ε_j ——极限位置时，第 j 关节的角加速度。

各变量单位均采用国际标准单位。

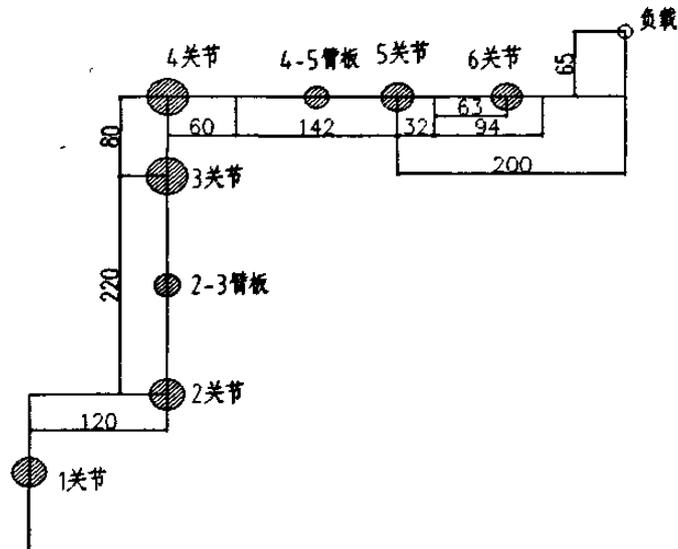


图 4.1 第 4、5、6 关节极限位置示意图

(1) 第 6 关节

如图 4.1，第 6 关节受：负载扭矩、自重偏心扭矩（此处为理想状态 0）和加速度附加扭矩。按式（4-2）计算得：

$$T_6 \approx 0.33\text{Nm}$$

(2) 第 5 关节

如图 4.1，第 5 关节受：自重偏心扭矩（此处为理想状态 0）、第 6 关节重力、负载产生的扭矩和加速度附加扭矩。按式（4-2）计算得：

$$T_5 \approx 1.60\text{Nm}$$

(3) 第 4 关节

如图 4.1，第 4 关节受：负载周向扭转力和加速度附加扭矩（4—5 臂板、第 5 关节、第 6 关节偏心力忽略）。

$$T_4 \approx 0.33\text{Nm}$$

(4) 第 3 关节

第 3 关节最不利位置如图 4.2 所示。需要说明的是：实际上受转角范围限制第 2 关节和第 4 关节角度不能为 180 度，此处假定在 180 度处计算，计算的结果比实际状况要安全。图 4.2 所示位置，第 3 关节和第 2 关节受力都为最大。

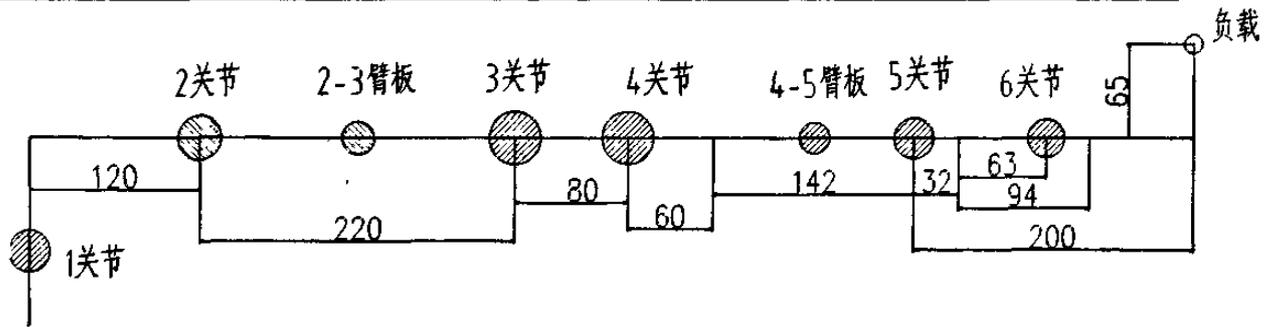


图 4.2 第 2 和第 3 关节受力最大位置

第 3 关节受：负载、第 6 关节、第 5 关节、4—5 臂板、第 4 关节重力产生的扭矩和加速度附加扭矩。

$$T_3 \approx 13.7\text{Nm}$$

(5) 第 2 关节

第 2 关节受力最大位置如图 4.2 所示。

第 2 关节受：负载、第 6 关节、第 5 关节、4—5 臂板、第 4 关节、第 3 关节、2—3 关节臂板重力产生的扭矩和加速度附加扭矩。

$$T_2 \approx 32.3\text{Nm}$$

(6) 第 1 关节

第 1 关节受力主要是加速度附加扭矩以及摩擦力。

$$T_1 \approx 8.7\text{Nm}$$

4.2.2 各关节功率估算

第 6 关节 (T) 功率：

$$p_6 = M_6 \times n_6 = 0.33 \times 1.22 = 0.40\text{W}$$

第 5 关节 (B) 功率：

$$p_5 = M_5 \times n_5 = 1.60 \times 0.875 = 1.4\text{W}$$

第 4 关节 (R) 功率：

$$p_4 = M_4 \times n_4 = 0.33 \times 0.875 = 0.289\text{W}$$

第 3 关节 (U) 功率：

$$p_3 = M_3 \times n_3 = 13.7 \times 0.658 = 8.9\text{W}$$

第 2 关节 (L) 功率：

$$p_2 = M_2 \times n_2 = 32.3 \times 0.26 = 8.5\text{W}$$

第1关节(S)功率:

$$P_1 = M_1 \times n_1 = 8.7 \times 0.56 = 4.87W$$

4.2.3 各关节电机、减速器选型

由4.2.1和4.2.2计算的各关节极限力矩和功率要求如表4.2所示。

表4.2 各关节极限力矩和功率计算结果

关节序号	1 (S)	2 (L)	3 (U)	4 (R)	5 (B)	6 (T)
极限力矩 <i>Nm</i>	8.7	32.3	13.7	0.33	1.60	0.33
计算功率 <i>W</i>	4.9	8.5	8.9	0.3	1.4	0.4

电机和减速器的选择应该综合考虑,所选电机的功率应该大于计算功率,并留有一定的余量,所选减速器的额定输出扭矩应该大于计算的关节极限力矩,并留有一定的余量。电机的额定扭矩乘以减速比再乘以效率后应该大于关节极限力矩,并有一定余量。

按照以上原则,选电机和减速器结果如表4.3所示:

表4.3 电机和减速器选型结果

关节号	第一关节	第二关节	第三关节	第四关节	第五关节	第六关节
电机型号	55LY54	55LYX04	45LYX04	36LYX04	36LYX04	A-Max22
电机参数	0.1274Nm 12.18W 1500r/min 0.87A	0.28Nm 16.83W 1500r/min 1.87A	0.13Nm 13.10W 2200r/min 1.65A	0.0294Nm 3.89W 3300r/min 1.65A	0.0294Nm 3.89W 3300r/min 1.65A	0.0154Nm 6W 9240r/min 1.08A
减速器型号	XB1-50-125-II	XB3-2-50-410	XB3-2-40-385	XB1-32-80	XB3-2-25-298	GP22C
减速器参数	i=125 T=33Nm	i=410 T=35Nm	i=385 T=15Nm	i=80 T=6.5Nm	i=298 T=2Nm	i=128 T=1.3Nm
实际驱动力矩	9.55Nm	55Nm	30Nm	1.4Nm	5.3Nm	1.2Nm

注 1: 实际驱动力矩按电机连续堵转力矩×传动比×减速器效率 (60%) 计算。

注 2: 第二关节减速器手册上给出的输出扭矩为 $T=30\text{Nm}$, 此值是按同机型小传动比减速器给出的, 实际上当传动比增加时, 由于啮合齿数增加, 能够提供的输出扭矩会相应增大, 此处 $T=35\text{Nm}$, 经厂家保证。

注 3: 第二关节实际驱动力矩 55Nm 是按电机连续堵转力矩×传动比×减速器效率 (60%)×0.8 算得, 原因是对该电机定货时, 对电机尺寸进行了调整, 导致电机的输出扭矩比标准制作时要小, 经厂家保证可以达到原输出扭矩的 80%以上。

比较表 4.2 和表 4.3 可得出结论, 所选各关节驱动元件和减速器都能满足设计要求。

4.3 编码器选型

传感器选用长春三峰传感器技术有限公司的 PHB-1-1000-Z05L, 其中 PHB-1 是传感器型号, 采用半空心轴联接方式, 1000 表示每转脉冲数, Z 表示尾端直插出线方式, 05 表示接口电源电压 5V, L 表示长线驱动器输出方式。它的体积小, 精度能满足要求, 电气接口便于控制, 能够判别正反转方向。电气参数如表 4.4 所示。它提供 10 个引脚, 各引脚含义如表 4.5。

表 4-4 PHB-1-1000-Z05L 电气参数表

电源电压 (V)	消耗电流 (mA)	输出电压 (V)		上升下降时间 (ns)	响应频率 (Hz)
		V _H	V _L		
5±0.25	100	3.4	0.3	≤100	≤680K

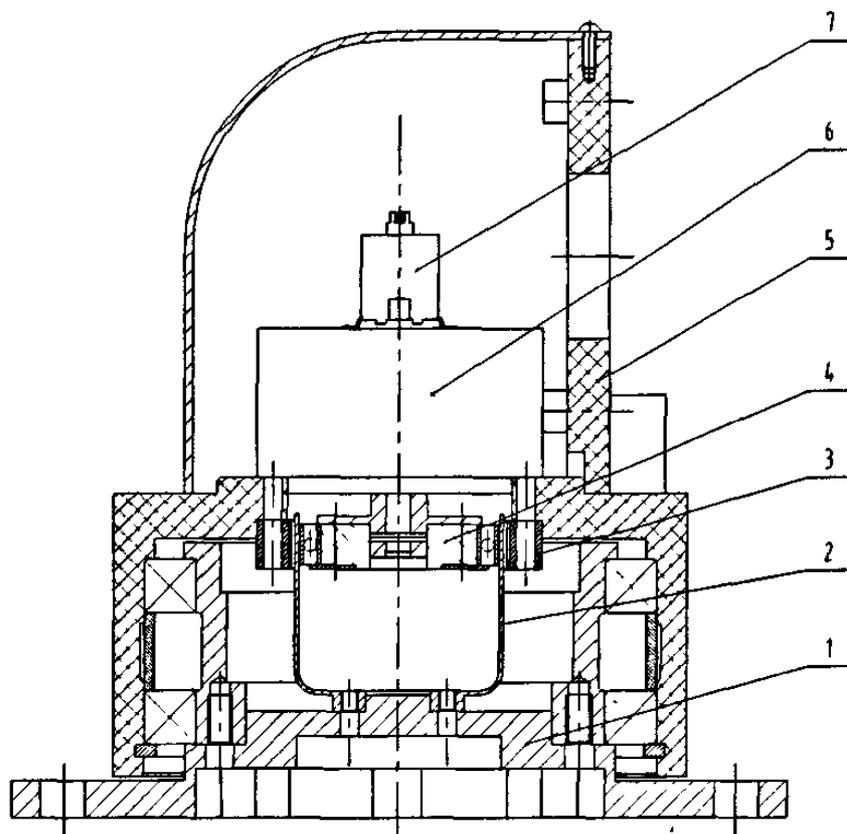
表 4-5 编码器引脚

引脚	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
信号	A+	A-	GND	GND	B+	B-	VCC	VCC	Z+	Z-
说明	输出	输出	0V 输入	0V 输入	输出	输出	5V 输入	5V 输入	输出	输出

4.4 机器人结构设计

4.4.1 第一、四关节结构设计

第一关节和第四关节选用的都是 XB1 型谐波减速器。图 4.3 是第一关节的装配图。电机轴与波发生器相联，刚轮、电机壳体和转动箱体固连，柔轮与基座相联。当电机轴转动时，柔轮相对刚轮以一定的传动比传递电机轴的转速。基座和转动箱体产生相对运动。当基座固定时，转动箱体旋转形成所要的运动。第四关节与第一关节结构原理相似。图 4.4 是第四关节装配图。



1.基座 2.柔轮 3.刚轮 4.波发生器 5.第1关节和第2关节的连接板 6.电机
7.编码器

图 4.3 第一关节装配图

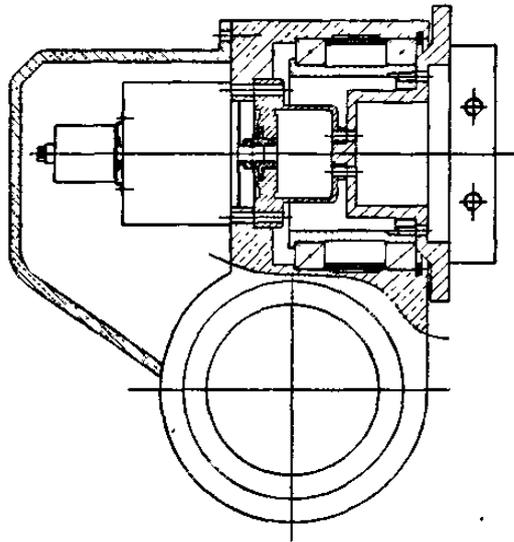
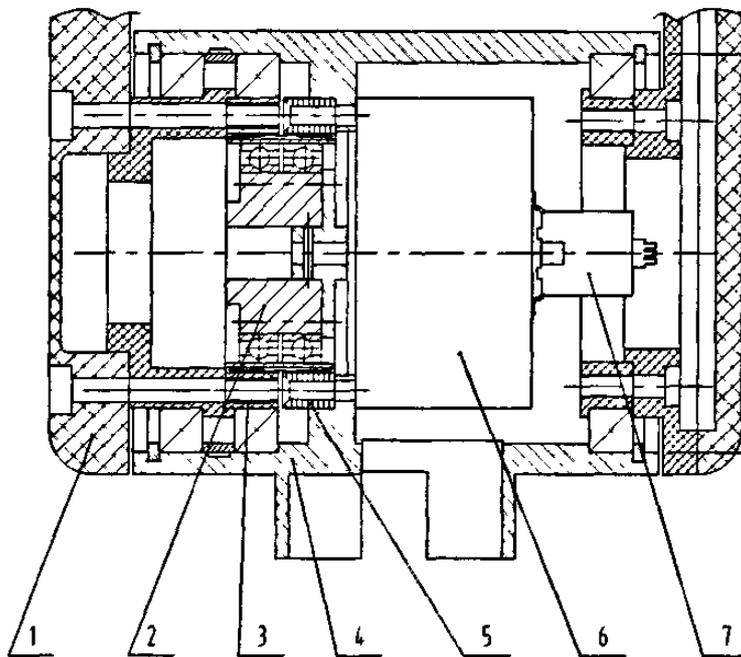


图 4.4 第四关节装配图

4.4.2 第二、三、五关节结构设计



1.臂板 2.波发生器 3.输出刚轮 4.固定箱体 5.输入刚轮 6.电机 7.编码器

图 4.5 第二关节装配图

第二、三、五关节选用的都是 XB3-2 型谐波减速器，图 4.5 是第二关节的装配图。电机轴与波发生器相联，输入刚轮、电机壳体和固定箱体固连，输出刚轮与臂板相联。当电机轴转动时，输出刚轮相对输入刚轮以一定的传

动比传递电机轴的转速。固定箱体和臂板产生相对运动。第三关节、第五关节与第二关节结构原理相似。

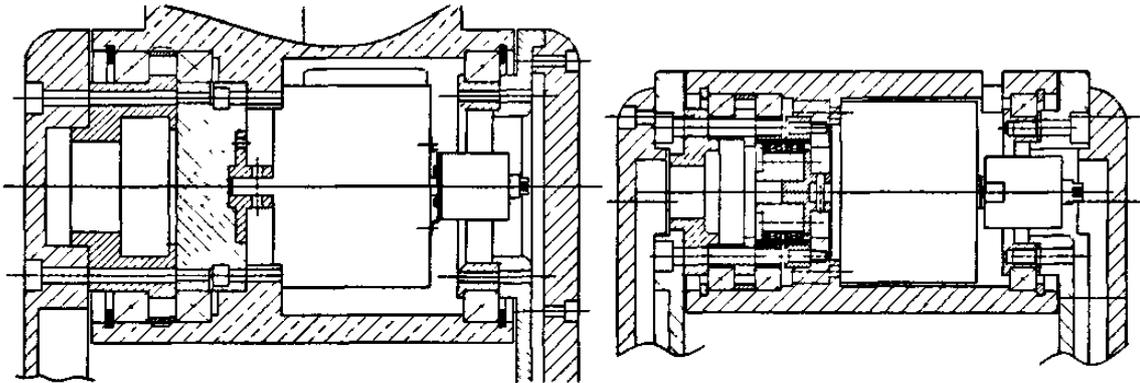
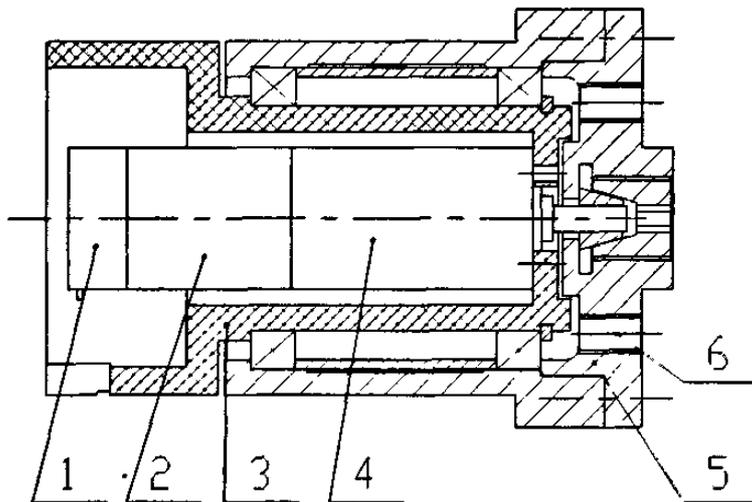


图 4.6 第三、五关节装配图

4.4.3 第六关节结构设计

第六关节选用的是 maxon 电机，减速器，编码器集成于一体，结构紧凑重量轻。减速器固定于基座，减速器输出轴通过锁紧螺母与法兰连接，法兰提供了一个圆柱凸台和四个螺纹孔，用于手爪定位和安装。



1.编码器 2.电机 3.固定箱体 4.减速器 5.联接法兰 6.手爪固定螺纹孔

图 4.7 第六关节装配图

4.4.4 手爪方案设计

采用钳型手爪，将动力装置固定在基座上，通过钢丝拉筋将动力引到末端手爪，拉紧拉筋手爪合拢，放开拉筋，手爪上的弹簧使手爪张开。这样的布置可以最大限度的减轻手爪的重量，同时，同一动力装置稍作调整就可以适应不同的手爪，符合通用化设计思想。

4.4.5 机器人三维模型

运用 pro/E 软件对机器人进行虚拟设计，获得机器人三维模型如图 4.8 所示。

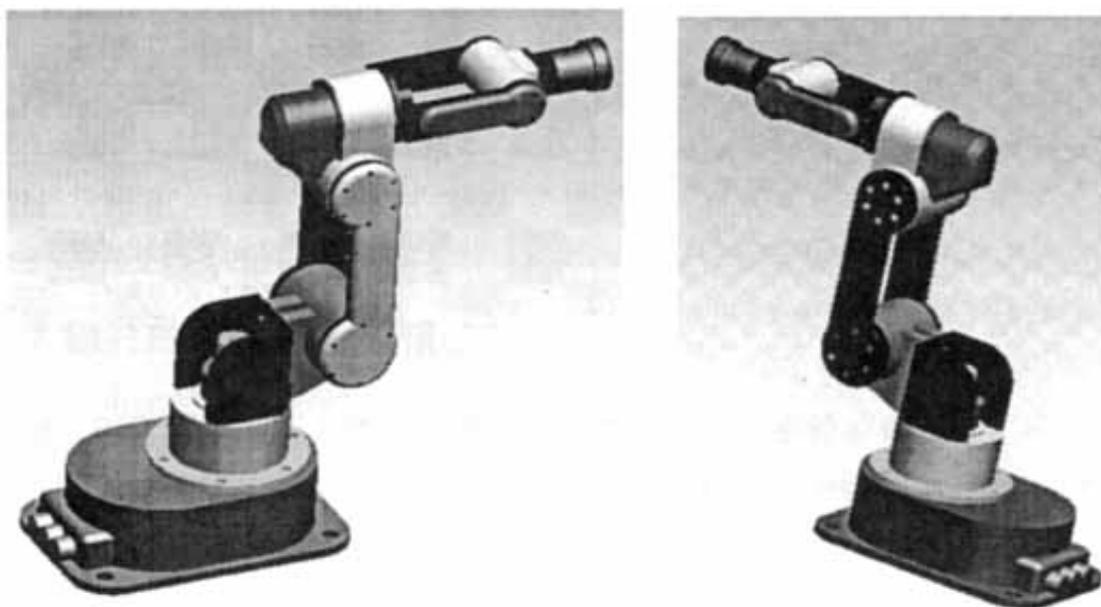


图 4.8 机器人三维模型

4.5 机器人关键零件校核

对关键受力零件进行校核是机械结构设计必不可少的工作，限于篇幅，本节只给出部分零件校核计算。

4.5.1 销的剪切强度校核

对于承受较大剪力的零件，如柔轮尾部，刚轮，臂板等，应设计抗剪销，

并对抗剪销进行剪切强度校核。抗剪销的材料选用 1Cr13, 查机械设计手册^[38]可知, $\sigma_{0.2}=345\text{MPa}$, 并取安全系数 $S=3.5$ 。

销的剪切强度应满足:

$$\sigma_{\max} = \frac{4F_{\max}}{\pi d^2 Z} < [\sigma] \quad (4-3)$$

式中: F_{\max} —— 最大剪切力

d —— 销的直径

Z —— 销的数目

$[\sigma]$ —— 销的许用应力

以第二关节输出刚轮联结销为例计算, 最大扭矩为 32.3Nm, 两个 $\Phi 6$ 销分布在 $\Phi 62$ 圆上, $F_{\max}=521\text{N}$, 代入(4-3)算得, $\sigma_{\max}=9.05\text{MPa} < [\sigma]=\sigma_{0.2}/S$ 。

所以设计是安全的。

4.5.2 销孔的挤压强度校核

对于销孔所受挤压力较大的零件, 如柔轮尾部、刚轮和臂板等, 应对其销孔挤压强度进行校核。与柔轮抗剪销相配壳体材料选用铝合金 2A12: 查机械设计手册^[38]可知, $\sigma_{p0.2}=275\text{MPa}$, 并取安全系数 $S=3.5$ 。

销孔挤压强度应满足:

$$\sigma_p = \frac{F_{\max}}{AZ} < [\sigma]_p \quad (4-4)$$

式中: F_{\max} —— 最大挤压力

A —— 销孔投影面积

Z —— 销孔的数目

$[\sigma]_p$ —— 销孔的许用应力

以第二关节主动臂板联结销为例计算, 最大扭矩为 32.3Nm, 两个 $\Phi 6$ 销

分布在 $\Phi 62$ 圆上, $F_{\max} = 521\text{N}$, 挤压面长为 16mm , 销直径为 6 , 故 $A = 96\text{mm}^2$,

代入(4-4)算得, $\sigma_p = 2.67\text{MPa} < [\sigma]_p = \sigma_{p0.2}/S$ 。所以设计是安全的。

4.6 本章小结

本章对六自由度机器人本体结构进行了设计。在对机器人关节工作状态进行分析的基础上, 选择了各关节电机、减速器的型号。对各关节的结构进行了详细的设计, 校核了部分关键零件, 给出了典型关节的装配图, 并对整个机器人本体进行了虚拟设计, 给出了三维仿真模型。

第 5 章 关节伺服系统设计

5.1 引言

驱动器是由力矩指令驱动关节运动的，运用机器人动力学知识可以推导建立出机器人的动力学方程：

$$\tau = D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + F(\dot{q}) + G(q)$$

式中：

q ——关节位置向量

\dot{q} ——关节速度向量

\ddot{q} ——关节加速度向量

D ——操作惯性张量

C ——与哥氏加速度和向心加速度有关的量

F ——与粘性摩擦和库仑摩擦有关的量

G ——惯性负载

τ ——关节广义力向量

然后根据轨迹规划生成的 q_d 、 \dot{q}_d 、 \ddot{q}_d 就可以得出相应的驱动力矩。然而，实际上，建立绝对准确的动力学方程是不可能的，即使是要得到相对比较准确的模型也是相当困难的，并且系统中还存在干扰和噪声，因而这种开环控制的策略是不实用的。构造高性能的控制系统的可行方法是使用反馈控制，用关节传感器组成闭环系统，计算伺服误差： $e = q_d - q$ ， $\dot{e} = \dot{q}_d - \dot{q}$ ，其中， e 和 \dot{e} 分别称为位置误差和速度误差。

这样设计控制系统的中心问题是保证所得到的闭环系统能满足一定的性能指标。

5.2 多关节控制方法

机器人控制系统是一个与运动学和动力学原理密切相关的、有耦合的、

非线性的多变量控制系统。由于它的特殊性，经典控制理论和现代控制理论都不能照搬使用。然而到目前为止，机器人控制理论还是不完整、不系统的。

根据多输入/多输出控制法则的分解方法，基于模型的控制法则可表示为：

$$\tau = \alpha \tau' + \beta$$

$$\begin{cases} \alpha = D(q) \\ \beta = C(q, \dot{q}) + F(\dot{q}) + G(q) \end{cases}$$

如果正确的选择 α 、 β ，那么系统对输入 τ' 表现为 n 个独立的单位质量系统。

多维系统的伺服法则为： $\tau' = \ddot{q}_d + k_v \dot{e} + k_p e$ ，其中 k_v 、 k_p 都是 $n \times n$ 的矩阵。控制系统框图如图 5.1。

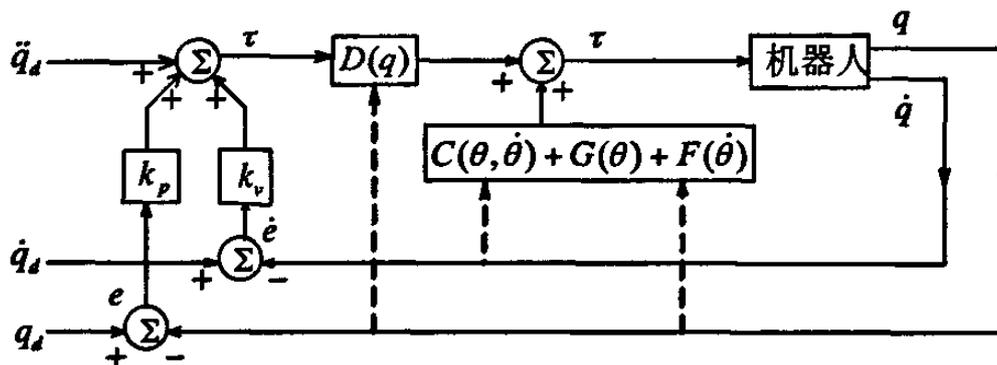


图 5.1 基于模型的控制系统

如果机器人的全部模型参数，如杆长、惯性等都为已知，那么上图实现的控制系统对于机器人关节任意位置和姿态，它都能使各关节处于临界阻尼状态。当然由于模型不可能很精确，所以这一点很难做到。考虑到未知的扰动力矩，系统的误差方程为：

$$\ddot{e} + k_v \dot{e} + k_p e = M^{-1}(q) \tau_d$$

其中， τ_d 表示各个关节的干扰力矩向量。

在目前的机器人控制器中，由于缺乏准确的参数知识、难于高速计算等原因，很少采用上述的完善的机械手的模型，而采用比较简单的控制法则——误差驱动。下面研究单个关节的控制方法。

5.3 单关节控制方法

对于大部分现有的工业机器人的控制方案，可以描述为：

$$\alpha = I$$

$$\beta = 0$$

其中 I 是单位矩阵。伺服部分： $\tau' = \ddot{q}_d + k_v \dot{e} + k_p e + k_i \int e dt$ ，而且多数情况下，将 \ddot{q}_d 置为零，也就是说，没有使用基于模型的部分。因为每个关节都是用单独的系统控制，所以这种 PID 控制方案比较简单，常常是每个关节用一台微处理器来处理。即使这样，要想描述以这种方式控制的机械手的性能也是不容易的，因为关节之间一个关节的运动会影响其他的关节。这些交互作用引起的误差是由误差驱动这个控制法则抑制的，要选择一个固定的增益，使机械手在任何形态下都处于临界阻尼状态下是不可能的。因此选择平均增益，使得当机械手得形态处于工作空间的中心位置时，系统接近于临界阻尼状态。在机械手处于各个极端的状态时，系统变成了欠阻尼或者过阻尼。由于在机械手的设计过程中可以采取一些具体措施，这种影响有可能比较小，达到比较好的控制效果。在这种系统中，保持比较高的增益很重要，这样可以使那些无法避免的扰动被迅速的抑制。当然，增益的上限值是由许多因素决定的，例如伺服速度，测量元件的噪声和结构共振等。

5.4 单关节伺服模型的建立

5.4.1 直流力矩电机模型

$$(1) \text{ 力矩方程: } T_M = C_m i_a \quad (5-1)$$

其中， C_m 为电动机力矩常数，Nm/A；

$$(2) \text{ 反电动势方程: } e = C_e \dot{\theta}_m \quad (5-2)$$

其中， C_e 为电动机电势常数，V/r·min⁻¹；

$$(3) \text{ 电枢回路电压方程: } L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e = U_a \quad (5-3)$$

其中, L_a 为电动机电枢回路电感, H;

$$(4) \text{ 力平衡方程: } T_M - T_L = J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m \quad (5-4)$$

其中, J_m 为折算到电机轴上的等效惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

$$(5) \text{ 电机轴转角与负载转角关系: } \dot{\theta} = \frac{1}{i} \dot{\theta}_m \quad (5-5)$$

其中 i 为传动比;

由式 (5-2) 和 (5-3), 经拉氏变换得:

$$I_a(s) = \frac{U_a(s)}{L_a s + R_a} - \frac{C_e \dot{\theta}_m(s)}{L_a s + R_a} \quad (5-6)$$

由 (5-1) 和 (5-4), 可得

$$\dot{\theta}_m(s) = \frac{C_m}{J_m s + B_m} I_a(s) - \frac{T_L}{J_m s + B_m} \quad (5-7)$$

由 (5-6) 和 (5-7) 可得系统模型方框图如图 5.2 所示。

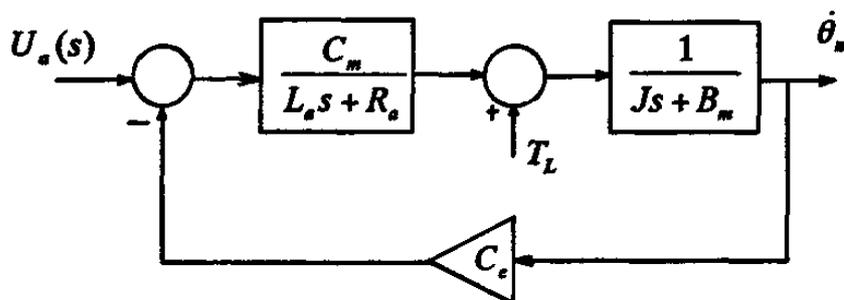


图 5.2 电机模型

若忽略粘滞摩擦, 令 $B_m = 0$, 由电机模型可推出其传递函数得:

$$W(s) = \frac{n(s)}{U_a(s)} = \frac{1/C_e}{T_a T_m s^2 + T_m s + 1} \quad (5-8)$$

其中: $T_a = \frac{L_a}{R_a}$ —— 电动机电磁时间常数, s;

R_a —— 电动机电枢回路电阻, Ω ;

$$T_m = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{R_a}{C_m C_e} = J_m \cdot \frac{R_a}{C_m C_e} \text{——电动机机电时间常数, s ;}$$

当各关节电机、减速器的参数给定以后，就可以得到一个二阶的控制对象模型，采用古典控制论方法，使用 PID 校正环节可以对其进行校正获得符合控制性能要求的闭环系统。

以第六关节为例：

由电机厂家得到本系统中的电机参数如表 5.1 所示：

表 5.1 电机参数表

电枢电阻 R_a (Ω)	2.27
电枢电感 L_a (H)	0.00011
电枢转动惯量 J ($kg \cdot m^2$)	3.81×10^{-7}
反电势系数 C_e (V/rpm)	0.00062
力矩常数 C_m (Nm/A)	0.0059

减速器转动惯量为 0.4×10^{-7} ，折算到电机轴上时要除以传动比的平方，远小于电机转动惯量，此处，忽略不计。

可算得 $T_m = 0.2364$ s, $T_d = 4.85 \times 10^{-5}$ s

代入具体参数值可得电机具体模型为：

$$\begin{aligned} W_d(s) &= \frac{n(s)}{U_d(s)} = \frac{1/C_e}{T_d T_m s^2 + T_m s + 1} = \frac{1/0.00062}{4.85 \times 10^{-5} \times 0.2364 s^2 + 0.2364 s + 1} \\ &= \frac{1613 \times 10^5}{1.155 s^2 + 2.364 s + 100000} \end{aligned}$$

5.4.2 控制器设计及仿真分析

伺服系统的控制结构一般由电流环、速度环和位置环组成，各环大多采用 PID 控制器。PID 控制存在着比例、积分、微分作用，能够满足伺服系统快、准、稳的要求，但各自也有缺点；比例控制的缺点是：系统存在误差；积分控制的缺点是：有滞后特性，会使系统动态性能变差；微分控制的缺点是：对干扰很敏感，会使系统抑制干扰能力降低。对于模型结构和参数确定

的控制对象，PID 控制器通过适当调整其参数，可以获得比较满意的控制效果。

对于一个具体的控制系统，并非总是要同时加入所有的比例、积分、微分环节，而是要根据控制对象的特性和控制性能要求进行选择，如果能不用其中的某个环节就能达到想要的控制效果，那么就应该省略该环节。这样做不仅可以降低 PID 参数整定的难度，同时还可以减小计算机在处理 PID 算法时的开销。

单关节系统采用速度位置双闭环控制，速度环采用 PI 控制，位置环采用比例控制器，如图 5.3 所示。这里借助 MATLAB 软件的单输入单输出线性分析工具，对单关节的速度、位置系统进行设计和仿真分析，获得的 PID 参数可以作为实际调试的参照。

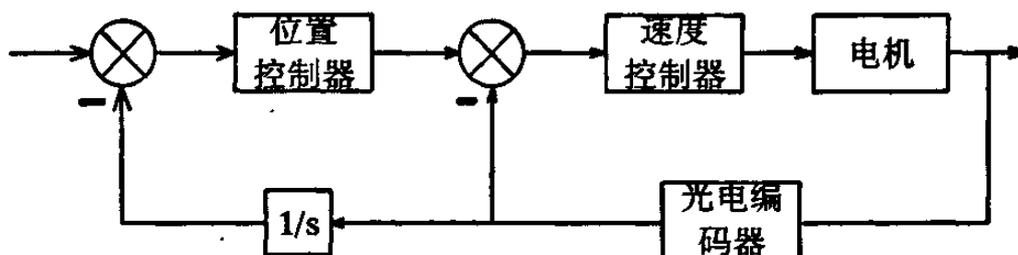


图 5.3 关节控制策略

首先，在 MATLAB 软件 Simulink 环境下建立电机模型如下：

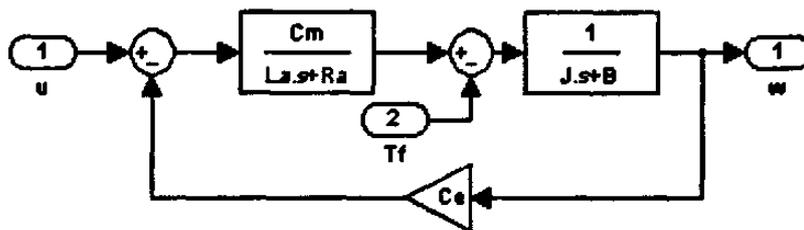


图 5.4 电机模型

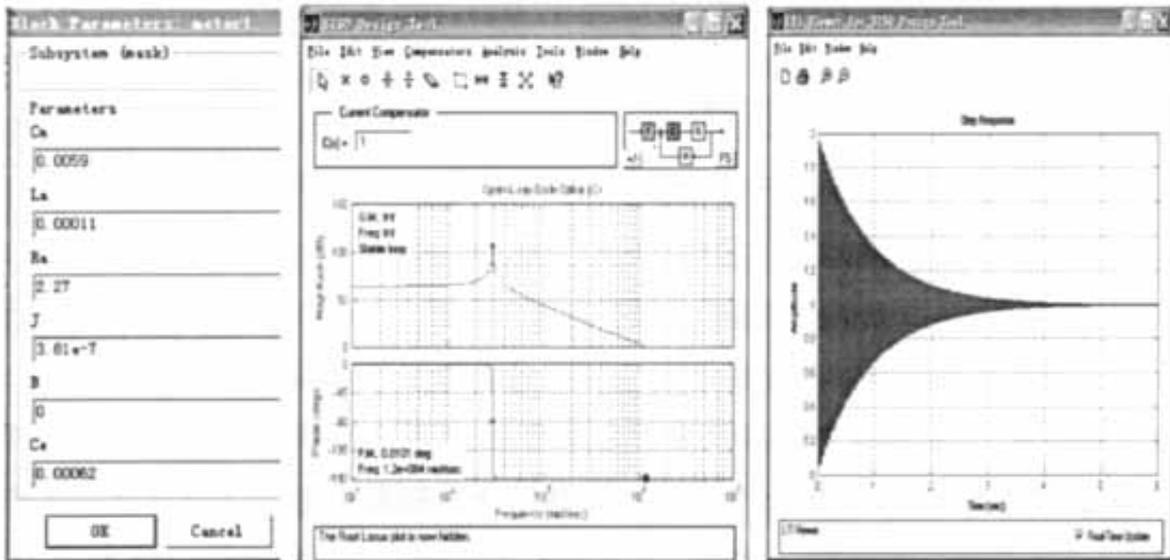


图 5.5 电机模型分析

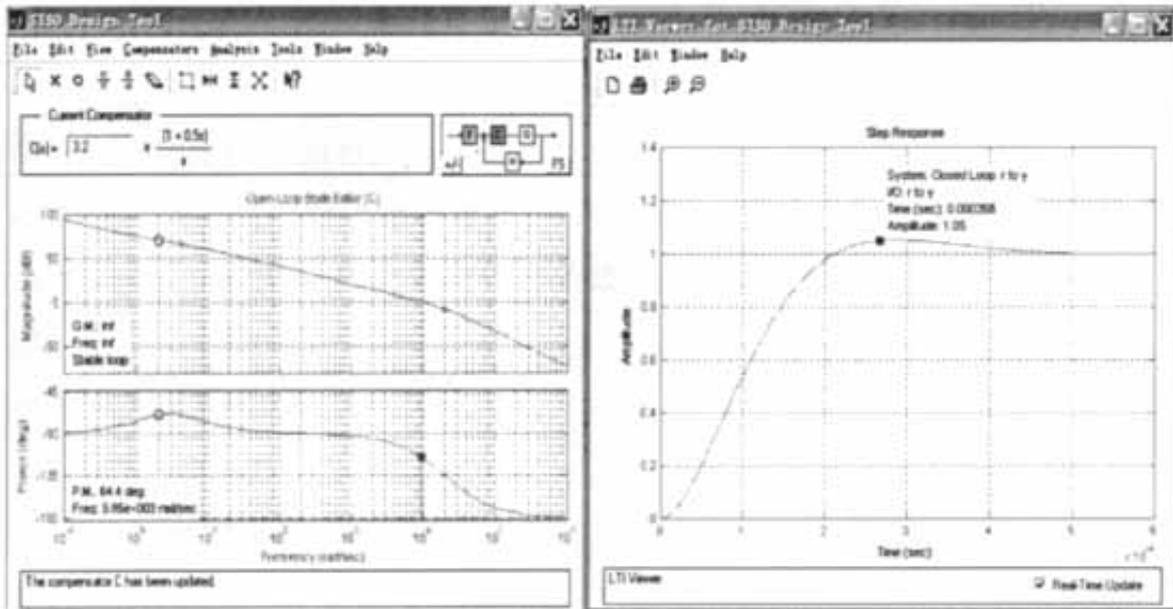


图 5.6 加 PI 控制器后的响应曲线

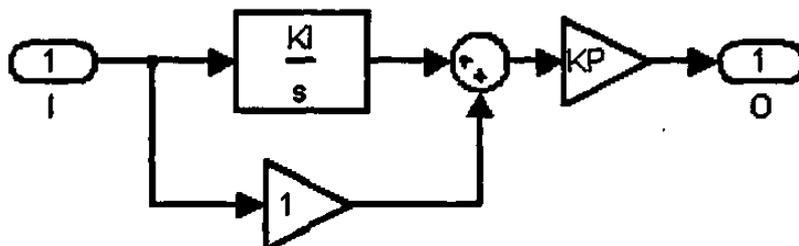


图 5.7 PI 控制器

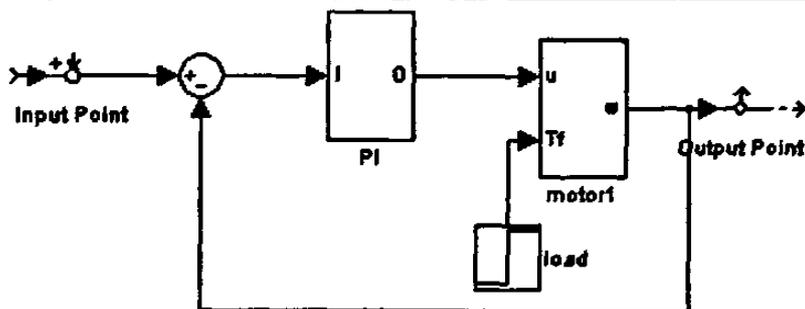


图 5.8 速度环控制框图

并对其进行封装，设定好各参数后，调用单输入单输出线性分析工具，将电机模型导入，得到开环 Bode 图以及它的阶跃响应如图 5.5，从图中可以看出，它的性能不能直接满足控制要求。引入 PI 控制器，选择参数 $K_I=2$ ， $K_P=1.6$ 时，得到的响应曲线如图 5.6 所示，此时，超调量不超过 5%，响应时间小于 1ms，完全可以满足控制要求。图 5.7 是封装的 PI 控制器内部结构。图 5.8 为速度环控制框图。

将整个速度环的控制模型（传递函数）导入 MATLAB 工作空间，再考虑位置环控制器的调整。用语句：

```
>> G1=g; //电机模型传递函数;
```

```
>> G2=C; //速度 PI 控制器的传递函数，从单输入单输出线性分析工具中导出;
```

```
>> sudu=feedback(G1*G2,1)
```

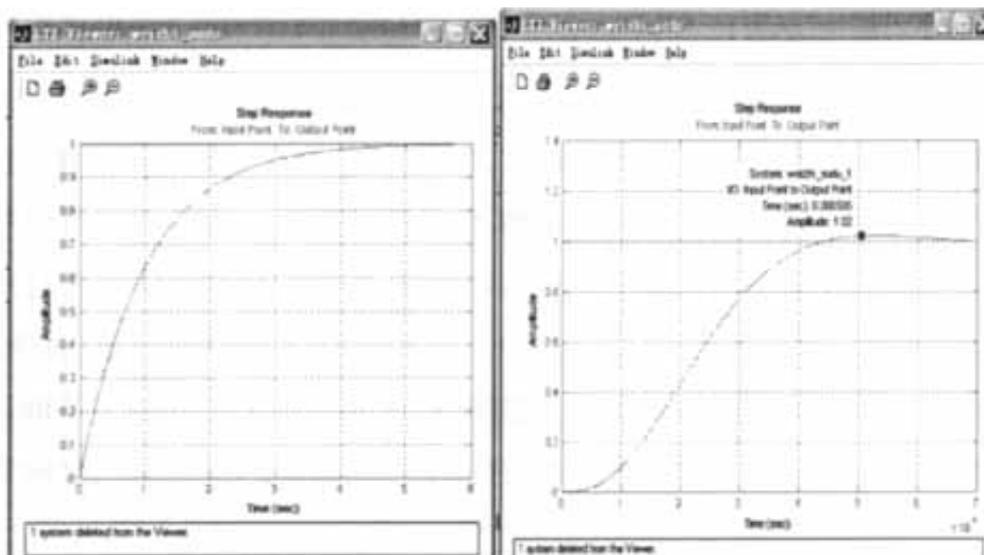
Zero/pole/gain:

224417391.3043 (s+2)

(s+2) (s^2 + 2.055e004s + 2.245e008)

得到速度环的传递函数。

运用类似的方法，调节位置环，当位置控制器参数 $K_p=4500$ ，得到的阶跃响应如图 5.9 (b) 所示。图 5.9 (a) 为未加控制器时的响应。比较 (a)、(b) 可以看出，未加控制器时，系统也是稳定的，但响应速度很慢，加上 P 控制器后，系统的超调量小于 2%，调节时间小于 1ms。完全可以满足控制要求。



(a) (b)

图 5.9 调节前后的位置响应曲线

最终，得到关节的控制框图如图 5.10。

应当指出，由软件仿真得出的 PID 参数并不一定就能直接用于实际控制，这是因为具体的控制对象与仿真模型总是由差异的。但是，这种仿真方法仍然是有意义的。首先，它可以找出参数的大致范围，避免漫无目的的调试；其次，它可以方便的反映对象中某种因素对控制性能的影响趋势，帮助我们更好的认识控制对象本身。

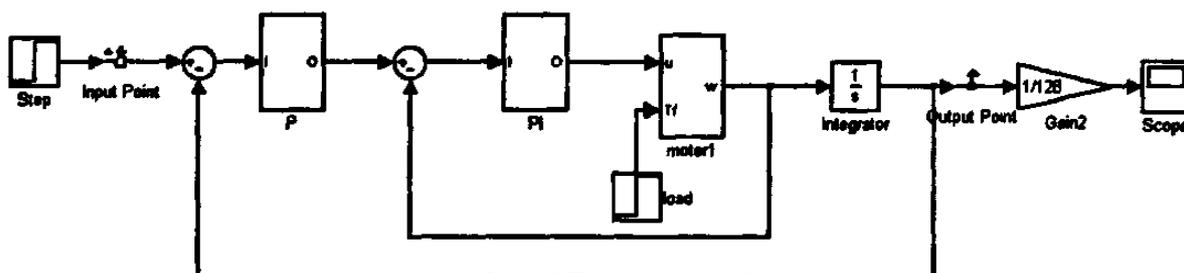


图 5.10 单关节控制框图

5.5 PID 算法的计算机实现

5.5.1 PID 控制方法的基本原理

计算机控制是一种采样控制，它只能根据采样时刻的偏差值计算控制量。

因此，连续 PID 控制算法不能直接使用，需要进行离散化处理。在计算机控制系统中，使用的是数字 PID 控制器，数字 PID 控制算法通常又分为位置式 PID 控制算法和增量式 PID 控制算法。在此基础上还有一些改进的 PID 算法，如积分分离 PID 算法、遇限削弱积分 PID 算法、不完全微分 PID 算法、微分先行 PID 算法和带死区的 PID 算法等。

1、位置式 PID 控制算法

按模拟 PID 控制算法，以一系列的采样时刻点 kT 代表连续时间 t ，以和式代替积分，以增量代替微分，则可作如下近似变换：

$$\begin{cases} t = kT \\ \int_0^t e(t)dt = T \sum_{j=0}^k e(jT) \\ \frac{de(t)}{dt} = \frac{e(kT) - e((k-1)T)}{T} \end{cases} \quad (k=1, 2, \dots) \quad (5-9)$$

式中， T 为采样周期。

显然，上述离散化过程中，采样周期 T 必须足够短，才能保证有足够的精度。将式(5-9)代入，可得离散的 PID 表达式为：

$$\begin{aligned} u(k) &= K_p(e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_D}{T}(e(k) - e(k-1))) \\ &= K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d(e(k) - e(k-1)) \end{aligned} \quad (5-10)$$

式中， k 为采样序号， $u(k)$ 为第 k 次采样时刻的计算机输出值， $e(k)$ 为第 k 次采样时刻输入的偏差值， $e(k-1)$ 为第 $k-1$ 次采样时刻输入的偏差值， K_i 为积分系数， $K_i = \frac{K_p T}{T_i}$ ， K_d 为微分系数， $K_d = \frac{K_p T_D}{T}$ 。

由于计算机输出的 $u(k)$ 直接去控制执行机构(如电机)， $u(k)$ 的值和执行机构的位置是一一对应的，所以通常称式(5-9)或式(5-10)为位置式 PID 控制算法。

位置式 PID 的输出不仅与本次偏差有关，而且与历次测量偏差值有关，

计算时要对 $e(k)$ 累加，计算机运算工作量大。为了克服上述位置式 PID 的不足，人们提出了一种增量式 PID 控制算法。

2、增量式 PID 控制算法

由式(5-10)可得 $k-1$ 时刻得控制量 $u(k-1)$ 为：

$$u(k-1) = K_p e(k-1) + K_i \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + K_d (e(k-1) - e(k-2))$$

$$\Delta u(k) = K_p (e(k) - e(k-1)) + K_i e(k) + K_d (e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (5-11)$$

由于式(5-11)中为第 k 次相对于第 $k-1$ 次的控制量的增量，故称之为增量式 PID 控制算法。

由上式可见，控制器的输出仅仅与最近三次的偏差值有关。由于计算机控制系统采用恒定的采样周期 T ，这样，在确定了 K_p 、 K_i 、 K_d 之后，根据最近三次的偏差值即可求出控制增量。

为了编程的方便，也可将式(5-11)改写为：

$$\Delta u(k) = Ae(k) - Be(k-1) + Ce(k-2) \quad (5-12)$$

$$\text{其中, } A = K_p \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_D}{T}\right)$$

$$B = -K_p \left(1 + 2\frac{T_D}{T}\right)$$

$$C = K_p \frac{T_D}{T}$$

虽然增量式 PID 只是在算法上作了一点改进，与位置式 PID 并无本质区别，但与位置式 PID 比较，它却有不少优点：

- 1) 计算机发生故障时，影响范围小。由于它每次只输出控制增量，即对应执行机构位置的变化量，输出变化范围不大，所以，当计算机发生故障时，不会严重影响生产过程。
- 2) 手动/自动切换时冲击小。由于它每次输出的最大幅度为 Δu_{\max} ，所以当控制从手动切换到自动时，可实现无扰动切换。
- 3) 计算工作量大。算式中不需要累加，且只用到 2 个历史数据 $u(k)$ 和

$u(k-1)$ 。通常采用平移法保存这 2 个历史数据。

5.5.2 增量型 PID 算法的程序实现

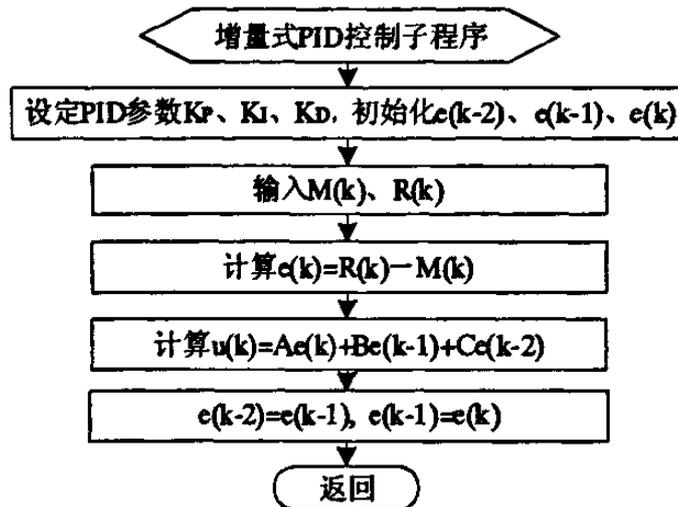


图 5.11 增量式 PID 程序流程

由式(5-11)和(5-12)可知, 当 K_p 、 K_i 、 K_d 设定后, 就可求得初始化参数 A 、 B 、 C 。编码器检测反馈电机位置值或速度值 $M(k)$, 上位机规划的位置和速度信息转化为电机的期望位置和速度 $R(k)$, 由 $e(k) = R(k) - M(k)$ 算得 k 时刻的误差, 并且从存储器中调用 $k-1$ 和 $k-2$ 时刻的误差值, 就可算得 k 时刻的控制量 $u(k)$, 程序流程如图 5.11。

5.6 本章小结

本章首先简单的回顾了基于模型的机器人控制方法, 针对基于模型的机器人多关节控制方法在实际使用中的困难, 又介绍了目前工业机器人普遍采用的简单的单关节控制方法。在此基础上, 本章着重讨论了关节控制模型建立的问题, 建立了关节的数学模型, 提出采用速度、位置双闭环的控制策略来实现关节控制, 运用 MATLAB 软件辅助设计方法设计了速度、位置 PID 控制器, 得到的结果可以指导实际的 PID 参数的调节。最后, 介绍了 PID 控制算法在计算机中的实现方法。

第 6 章 教学机器人轨迹的生成及其关键算法的实现

6.1 引言

在机器人完成给定的任务之前，应该规定它的操作顺序，行动步骤和作业进程，即任务规划。规划实际上是一种问题的求解技术，涉及的范围十分广泛。如图 6.1 所示，任务规划器根据输入的任务说明，规划执行任务所需的运动，根据环境的内部模型和外部传感器在线采集的数据产生控制指令。而轨迹规划是根据作业任务的要求，计算出预期的运动轨迹。

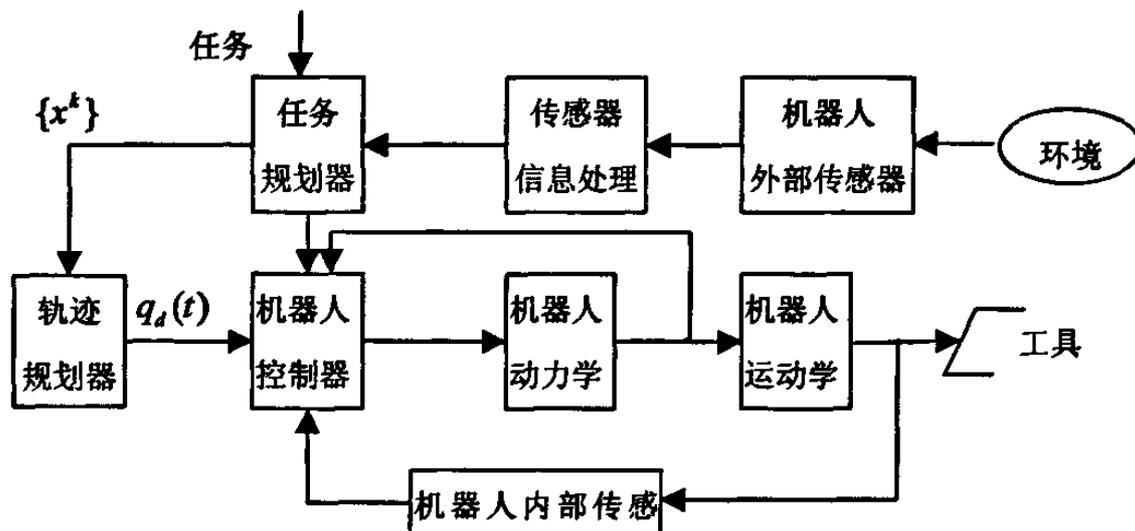


图 6.1 机器人任务规划

6.2 教学机器人的轨迹规划

轨迹规划至少包括以下两方面的内容：一是对机器人的任务、运动路径和轨迹进行数学描述，二是将数学描述出来的轨迹转化为机器人控制器能够接受的控制序列。对于教学机器人，特别是在采用示教—再现工作方式时，第一方面的内容更多情况下是有人工来完成，通过主从示教、示教盒示教或虚拟示教对轨迹进行示教或描述，而由轨迹规划器自动完成将轨迹转化为控制器可以接受的控制序列。对于教学机器人轨迹规划器通常要求能够实现以

下基本插补运算：在关节空间实现点到点的插补、在笛卡尔空间实现直线、圆弧的插补。有了这些基本的插补算法就可以拟合出所需要的复杂空间轨迹，配合运动学正、反解算法就可以生成控制器所需要的控制序列。以下讨论这些关键算法的实现方法。

6.3 关键算法的实现

6.3.1 机器人运动正、逆解程序实现

1、运动学正解程序

机器人的正解问题，是已知各杆的结构参数和关节变量，求末端执行器空间位置和姿态，由第 3 章讨论的结果可以知道： ${}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6$ 。其正解函数的程序代码框架如下：

```
void FW_Kinematics(double theta1, double theta2, double theta3, double theta4,
double theta5, double theta6)
{.....
    //声明各变量类型，其中需要用到的 DH 参数值、反映基础位置和工具形状
    的参数都是外部变量；
    .....
    //计算 ${}^0T_6$  矩阵的各元素值。即工具末端点相对于基础系的位姿。计算的方
    法参见第 3 章的运动学正解部分。
    .....
    //将计算的结果传给外部的全局变量；
};
```

输入是六个关节的转角位置，经过计算之后，函数将计算的结果（末端工具点相对于基础坐标系的位姿）传递给外部的全局变量，函数返回值为空。

2、运动学逆解程序

运动学逆解是在已知手部（末端）空间位姿的情况下，求解出关节变量。第 3 章已经推导出机器人的逆解符号表达式。逆解程序流程如图 6.2 所示。首先按机器人的实际参数给各变量赋初始值，然后按第 3 章的方法求出所有

可能的 16 组解，接着检验每组解的各关节转角是否在允许的转角范围之类，将不满足要求的解舍去，对余下的几组解计算一个优化目标函数值，选择一组最优解，最后将得到的这组最优解传递给外部全局变量。

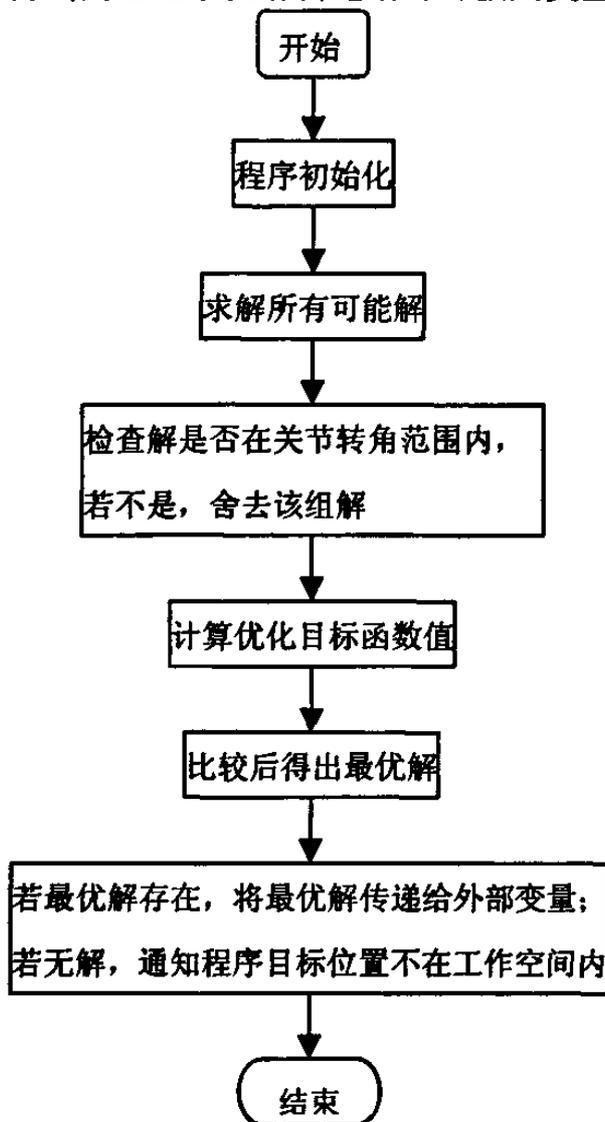


图 6.2 逆解求解流程

6.3.2 关节空间插补算法

关节空间的插值采用过路径点的三次多项式插值法。其原理是利用已知某一关节运动初始时刻 t_i 的位置 $\theta(t_i)$ 、速度 $\dot{\theta}(t_i)$ 和期望 t_f 时刻的位置 $\theta(t_f)$ 、速度 $\dot{\theta}(t_f)$ ，确定一个三次多项式 $\theta(t) = c_0 + c_1 t + c_2 t^2 + c_3 t^3$ 的四个系数 c_0 、 c_1 、 c_2 、 c_3 。然后利用得到的多项式，基于时间的变化，产生一系列的包含位置、

速度信息的点序列 $(\theta(t_1), \dot{\theta}(t_1)), (\theta(t_2), \dot{\theta}(t_2)), \dots, (\theta(t_n), \dot{\theta}(t_n))$ 。插补软件设计流程如图 6.3 所示。

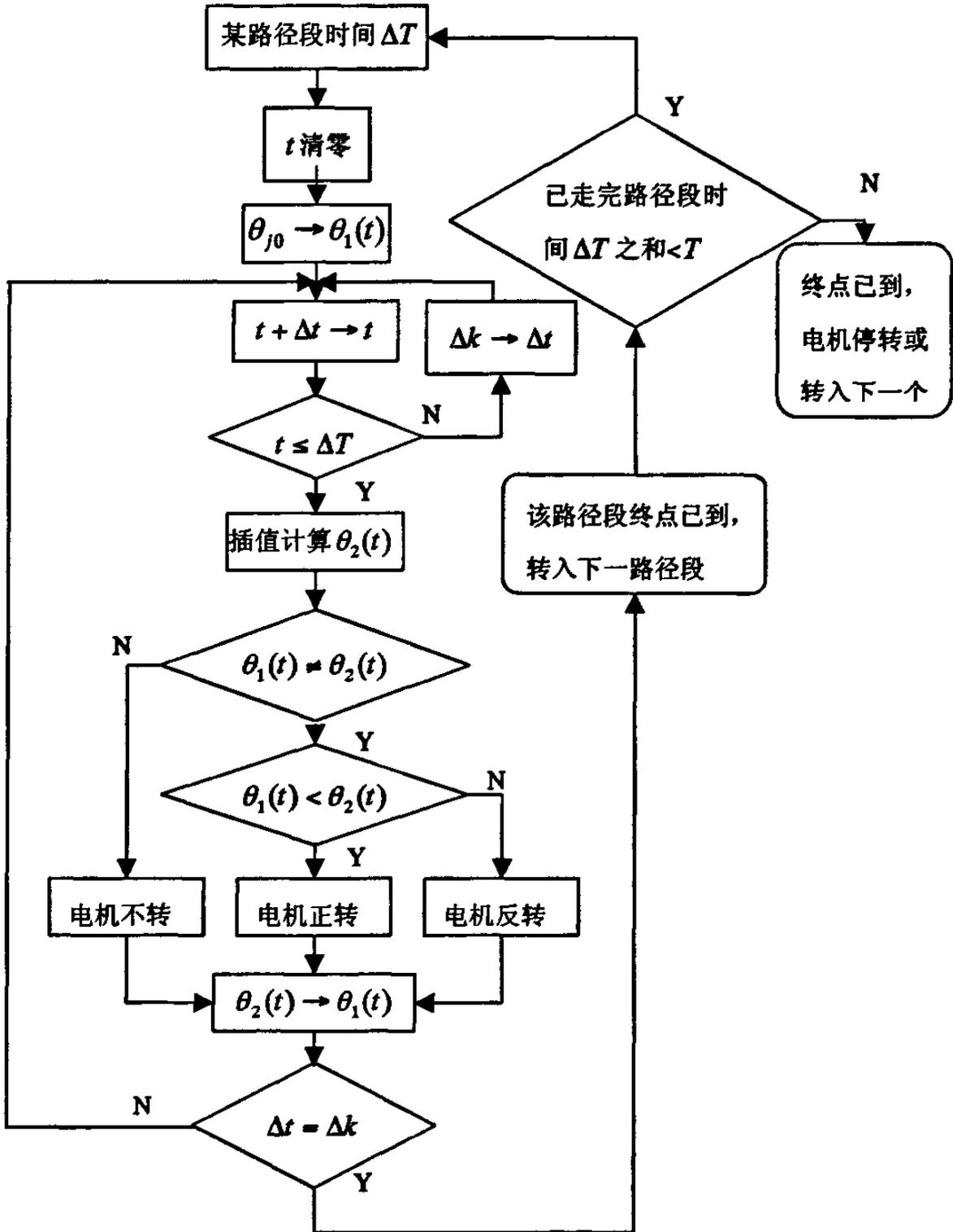


图 6.3 关节空间插补流程

流程图中 T 为走完整段轨迹的时间, ΔT 为各个路径段的运行时间, t 为

实际运行时间，其步长 Δt 可根据机器人作业的具体情况进行调整， $\Delta k = \Delta T - t$ 为最后一步的修正量，其初值为 0， θ_{j0} 为第 j 关节在各个路径段的起始关节角， $\theta_j(t)$ 为 t 时刻的关节变量插值。

6.3.3 笛卡儿空间的直线插补算法

空间直线插补是给定直线始末两点的位姿，求轨迹中间点(插补点)的位姿。直线插补时，机器人的姿态变化按照给定的步长从初始姿态均匀向末端点姿态变化。已知直线始末两点的坐标值 $P1(x1, y1, z1)$ 和 $P2(x2, y2, z2)$ ，这些坐标点从对话框的编辑框获取或是示教记录的点位姿，可以通过以下步骤进行直线轨迹的定步长插补：

1、给定步长参数 ΔL ，在程序中，步长参数可以由操作者输入或使用默认值，它在某种意义上反映了要求的直线精度；

2、求直线的长度 L Length：

$$L = \sqrt{(x2 - x1)^2 + (y2 - y1)^2 + (z2 - z1)^2}$$

3、计算插补总步数 N ， N 等于直线长度除以步长 ΔL ：

$$N = L \text{Length} / \Delta L$$

4、计算插补增量

$$\Delta x = (x2 - x1) / N$$

$$\Delta y = (y2 - y1) / N$$

$$\Delta z = (z2 - z1) / N$$

5、计算第 i 个插补点的坐标值：

$$x_i = x1 + i \times \Delta x$$

$$y_i = y1 + i \times \Delta y$$

$$z_i = z1 + i \times \Delta z$$

$$(i=1, 2, \dots, N-1)$$

6.3.4 笛卡儿空间的平面圆弧插补算法

此处的平面圆弧是指圆弧平面与基础坐标系的三大平面之一重合，以 XOY 平面圆弧为例。

已知不在同一直线上的三点坐标 $P_1(x_1, y_1)$, $P_2(x_2, y_2)$, $P_3(x_3, y_3)$ 及这三点对应的末端的姿态，如图 6.4 所示。其插补算法如下：

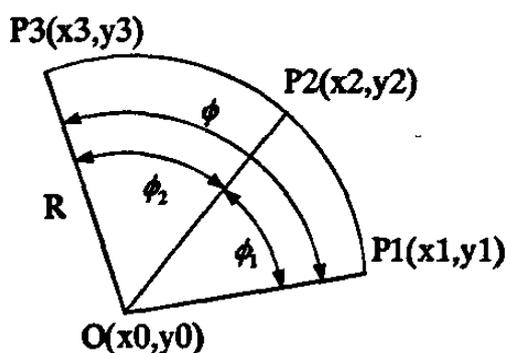


图 6.4 平面圆弧插补

1、由 P_1 、 P_2 、 P_3 确定圆心坐标 (x_0, y_0)

由等式：

$$(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 = (x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 = (x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2$$

得出圆弧圆心点 (x_0, y_0) 。

2、求圆弧半径 R 和始末角位置 θ_1, θ_3

$$R = \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}$$

$$\theta_1 = \arctan \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}$$

$$\theta_3 = \arctan \frac{y_3 - y_0}{x_3 - x_0}$$

3、总的圆心角 $\phi = \phi_1 + \phi_2$

$$\phi_1 = \arccos \frac{2R^2 - ((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2)}{2R^2}$$

$$\phi_2 = \arccos \frac{2R^2 - ((x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2)}{2R^2}$$

4、计算在 ΔT 时间内角位移增量 $\Delta\phi$

$$\Delta\phi = (\Delta T \cdot v) / R$$

5、计算所需插补步数 N

$$N = \phi / \Delta\phi - 1 \quad N \text{ 为整数}$$

6、计算插补点位置

圆弧方程为：

$$\begin{cases} x = x_0 + R \cos \theta_1 \\ y = y_0 + R \sin \theta_1 \end{cases}$$

第 i 个插补点坐标：

$$\begin{cases} x_i = x_0 + R \cos(\theta_1 + i \times \Delta\phi) \\ y_i = y_0 + R \sin(\theta_1 + i \times \Delta\phi) \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, N)$$

6.3.5 笛卡儿空间的空间圆弧插补算法

这里的空间圆弧是指三维空间中任意一个平面里的圆弧。可以分三步来实现空间圆弧的插补计算：第一步建立新坐标系将空间圆弧转化为平面圆弧；第二步利用平面圆弧插补算法，求出平面圆弧插补点的坐标值；第三步将这些点的坐标值转换为基础坐标系下的坐标值。

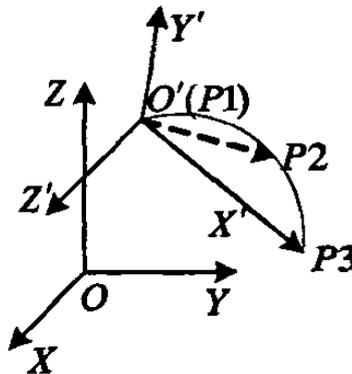


图 6.5 空间圆弧插补

如图 6.5 所示，已知不共线的空间三点坐标 $P_1(x_1, y_1, z_1)$, $P_2(x_2,$

$y_2, z_2)$, $P_3 (x_3, y_3, z_3)$, 由他们可以确定一个圆弧。

1、首先建立一个新的坐标系 $O'X'Y'Z'$ 空间圆弧转化为平面圆弧

以圆弧起点 P_1 为原点 O' , P_1P_3 为 X' 轴, $P_1P_3 \times P_1P_2$ 为 Z' 轴, Y' 轴由右手法则确定。这样圆弧就落在 $O'X'Y'$ 平面内。将 P_1, P_2, P_3 在坐标系 $O'X'Y'Z'$ 内表示。需要用到的齐次变换 0T 在第 3 步中给出。

2、利用平面圆弧插补算法求解插补点的坐标值

3、将第二步计算得到的 $O'X'Y'Z'$ 下的坐标值转换为基础坐标系 $OXYZ$ 下的坐标值。

要将 $O'X'Y'Z'$ 下的坐标值转换为基础坐标系 $OXYZ$ 下的坐标值, 首先就要求解 $O'X'Y'Z'$ 到 $OXYZ$ 的齐次变换。它由各轴的方向余弦以及原点坐标平移确定。

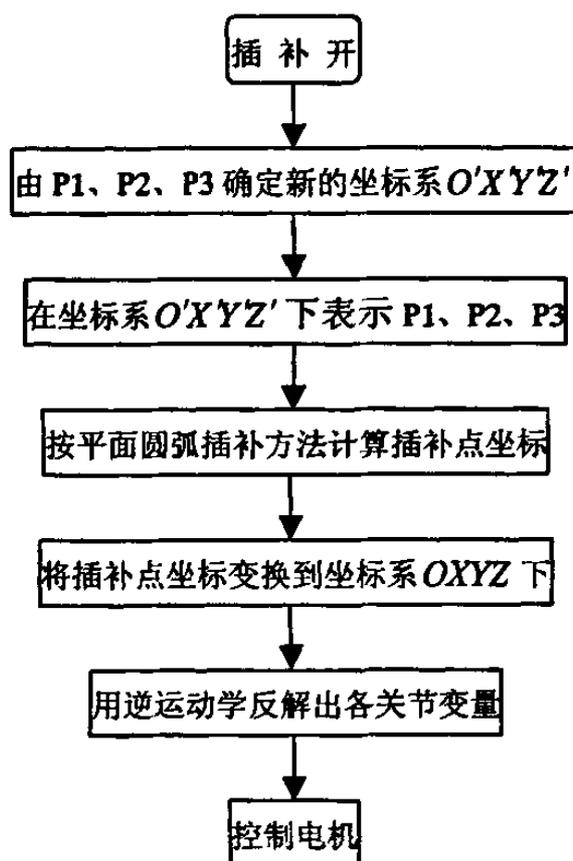


图 6.6 空间圆弧插补流程

X' 轴与 P_1P_3 向量方向一致:

$$P1P3 = \{x3 - x1, y3 - y1, z3 - z1\}$$

Z' 轴与 $P1P3 \times P1P2$ 向量方向一致:

$$P1P2 = \{x2 - x1, y2 - y1, z2 - z1\}$$

进而可求得 $P1P3 \times P1P2$

Y' 轴由 $Z' \times X'$ 确定

将向量单位化后可得到 X' 、 Y' 、 Z' 的单位向量:

$$\{n_x, n_y, n_z\}, \{o_x, o_y, o_z\}, \{a_x, a_y, a_z\}$$

那么, 从 $OXYZ$ 坐标系到 $O'X'Y'Z'$ 坐标系的齐次变换可表示如下:

$${}^0T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & x1 \\ n_y & o_y & a_y & y1 \\ n_z & o_z & a_z & z1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

从 $O'X'Y'Z'$ 坐标系到 $OXYZ$ 坐标系的齐次变换是 0T 的逆变换。

$${}^0T = \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z & -(n_x \cdot x1 + n_y \cdot y1 + n_z \cdot z1) \\ o_x & o_y & o_z & -(o_x \cdot x1 + o_y \cdot y1 + o_z \cdot z1) \\ a_x & a_y & a_z & -(a_x \cdot x1 + a_y \cdot y1 + a_z \cdot z1) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

空间圆弧插补的流程如图 6.6 所示。

6.3.6 笛卡儿空间插补算法的补充说明

应当指出前面所表述的笛卡儿空间插补算法实际上是维持姿态不变对位置进行插补。它在实际情况中也用得非常广泛, 例如插销装配、直线弧焊、在笛卡儿空间相对于世界坐标系的平移、相对于工具坐标系的平移等。但有时也会用到在插补过程中要求姿态也发生变化的情况, 这时, 至少有三种插补方案可供选择: 第一, 可以先保持位置不变, 对姿态进行插补, 调整好姿态后, 再对位置进行插补; 第二, 先对位置进行插补, 到达末端位置时, 再对姿态进行插补; 第三, 位置和姿态同时进行插补。具体使用哪一种, 由工作任务要求来确定。

6.4 本章小结

本章讨论了教学机器人轨迹规划的相关问题。对运动学正、逆解的程序实现方法，关节空间插补方法，笛卡儿空间直线、平面圆弧、空间圆弧插补算法进行了设计。

结 论

本文根据教学和科研的需求对六自由度教学机器人系统进行了研制，设计并加工了机器人本体，并对有关关键技术进行了研究。论文主要完成了以下几方面的工作：

1. 根据教学机器人的任务要求，确定了教学机器人的基本技术要求，提出了六自由度的总体构型，完成了机器人系统总体方案的设计。

2. 采用 D-H 法建立了六自由度教学机器人的运动学模型，对教学机器人的运动学正、逆解进行了计算，得到了运动学正解和逆解，并推导出了教学机器人的雅可比矩阵；对机器人的工作空间进行了仿真分析，得出了机器人的工作空间图；仿真分析了传感器、减速器误差和加工制造误差引起的机器人末端位置误差，仿真分析的结果表明拟定的精度是可以实现的。

3. 完成了教学机器人本体结构的施工设计并加工出工程样机。

4. 建立了单关节控制模型，设计了单关节位置伺服系统，并利用 MATLAB 软件对控制器的参数进行了调节，给出了所采用的增量式 PID 算法的计算机实现方法。

5. 探讨了教学机器人轨迹规划的有关问题，给出了运动学正反解、关节空间插补算法和笛卡儿空间直线、圆弧插补算法的程序实现方法。

本课题还有许多工作有待进一步完成，下一步的工作主要包括：

1. 完成教学机器人的控制系统测试；
2. 编写和测试程序代码，最终实现教学机器人上位机上的各项软件功能；
3. 对机器人系统进行联调，最终完成整个教学机器人系统的研制工作。

参考文献

- [1] 顾震宇. 全球工业机器人产业现状与趋势. 机电一体化. 2006(2): 6-9 页
- [2] 伍臻, 王虎符, 崔兴强. 一种示教机器人及其双处理器控制系统. 机械与电子. 2004(12): 64-66 页
- [3] 杨爱英, 唐曙光. AutoCAD 和 3DS MAX 在机器人教学中的应用. 株洲工学院学报. 2005, 19(2): 113-115 页
- [4] 李劲松. 教学机器人在现代实验教学中的应用. 实验室研究与探索. 2004, 23(1): 9-11 页
- [5] 殷埝生, 王刚, 孙晨. 一种教学机器人及其单片机控制系统. 仪表技术与传感器. 2000(3): 32-34 页
- [6] 陈静, 王明辉. 面向对象的多关节教学机器人控制软件设计. 机械工程与自动化. 2006(2): 37-38 页
- [7] 日本机器人技术协会编. 宗光华, 刘海波等译. 机器人技术手册. 科学出版社, 1996
- [8] 王京编译. 2004 年全球机器人统计数据. 机器人技术与应用. 2005
- [9] 蔡鹤皋. 机器人技术的发展与在制造业中的应用. 机械制造与自动化. 2004, 33(1) : 6-10 页
- [10] 陈博. 机器人技术的发展趋势与最新发展. 西安教育学院学报. 2004, 19(3): 85-87 页
- [11] 王田苗. 工业机器人发展思考. 机器人技术与应用. 2004(2): 1-4 页
- [12] 孙立宁. 机器人技术国内外发展状况. 国内外机电一体化技术. 2002, 5(4): 29-41 页
- [13] 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 页
- [14] 蔡自兴. 机器人学的发展趋势和发展战略. 高技术通讯. 2001(6) : 107-110 页

- [15] 刘进长, 辛健成. 机器人世界. 河南科学技术出版社, 2000: 117-119 页
- [16] 863 计划智能机器人主题专家组. 863 计划对中国机器人发展的巨大作用和深远影响. 机器人技术与应用. 2001(3): 4 页
- [17] 诸静. 机器人技术与控制技术. 浙江大学出版社, 1991: 7-10 页, 115-126 页, 127-143 页, 222-253 页
- [18] 熊有伦. 机器人技术基础. 华中科技大学出版社, 2002
- [19] 约翰 J. 克拉克. 机器人学导论(英文版第三版). 机械工业出版社, 2005
- [20] [美]Saeed B. Niku 著, 孙富春等译. 机器人学导论. 电子工业出版社, 2004
- [21] 霍伟. 机器人动力学与控制. 高等教育出版社, 2005
- [22] P. I. Corke. A Robotics Toolbox for MATLAB. IEEE Robotics and Automation Magazine, 1996, 1(3): 24-32P
- [23] 薛定宇, 陈阳泉. 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术与应用. 清华大学出版社, 2005
- [24] P. I. Corke. Robotics Toolbox for MATLAB (Release 6) [EB/OL]. <http://www.cat.csiro.au/cmst/staff/pic/robot>, 2005
- [25] 崔建伟, 宋爱国, 黄惟一. 遥操作系统中 MOTOMAN-SV3X 机器人的运动建模研究. 东南大学学报(自然科学版). 2003, 33(4): 424-429 页
- [26] Paul R P, Shimano B E, Mayer G. Kinematic control equations for simple manipulations. IEEE Trans SMC, 1981, 11(6) : 449-455P
- [27] Paul R P. Robot Manipulator: Mathematics, Programming and Control. Cambridge: MIT press, 1981, 181-187P
- [28] Fu K S, Gonzalez R C, Lee C S G. Robotics Control Senses Vision and Intelligent. New York: Mc Graw-Hill, 1987, 78-82P
- [29] Dinesh Manocha, John F Canny. Efficient inverse kinematics for general 6R manipulators. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1994, 10(5):648-657P

- [30] 贺懿耀. PUMA560 逆运动学方程的新解法. 机器人. 1989, 10(3): 19-26 页
- [31] 陈登瑞. 六自由度机械手本体结构关键技术研究. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2006
- [32] 谭颖. 六自由度检修机器人控制系统的研究. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2006
- [33] 钱朋安, 蒺济民. 机器人运动学仿真教学软件研究. 合肥工业大学学报 (自然科学版). 2005, 28(7): 760-763 页
- [34] 王天义, 饶建华, 杨建中. 一种新型 RS-485 接口芯片在远程多机通讯中的应用. 中国测试技术. 2004, 30(6): 53-55 页
- [35] 张智. 蒸汽发生器检修用机械手控制系统设计. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 2006
- [36] 董高云, 秦志强, 赵锡芳. 用 Visual C++开发机器人微机屏幕示教盒. 计算机工程与应用. 2001(15): 166-168 页
- [37] 胡寿松. 自动控制原理. 科学出版社, 2001
- [38] 成大先. 机械设计手册 (第四版第 2 卷). 化学工业出版社, 2002
- [39] 熊国辉. 基于 OPENGL 技术 6R 机器人的仿真. 北京邮电大学硕士论文, 2006
- [40] 张立勋, 董玉红. 机电系统仿真与设计. 哈尔滨工程大学出版社, 2005
- [41] Jinqiu Chen. Structural Optimization of Robots and 3D Modeling of Robot Workspace. A Dissertation Presented for the Doctor of Philosophy Degree of The University of Memphis, 2005.
- [42] Abdel-Malek K, Yeh H J. Analytical Boundary of the Workspace for General 3-DOF mechanisms. International Journal of Robotics Research, 1997, 16(2):198-213P
- [43] Abdel-Malek K, Yeh H J. Worksapce, void and volume Determination of the General 5-DOF Manipulator. Mechanics of Structures and Mechines, 27(1):97-117P

- [44] 东方人华. Visual C++ 6.0 范例入门与提高. 清华大学出版社, 2003
- [45] Jorge Angeles. 宋伟刚译. 机器人机械系统原理理论、方法和算法. 机械工业出版社, 2004
- [46] 姬清华. 工业机器人的力学分析. 平原大学学报. 2005, 22(3):116-117 页
- [47] Ebert U I, Chirikjian G S. Discretely Actuated Manipulator Workspace Generation by closed form Convolution. Journal of Mechanical Design, 120(2):245-251P
- [48] Huang Z, Yao Y L. Extension of Usable Workspace of Robot Planning. Robotica, 17(3):293-301P
- [49] Park F C, Brockett R W. Kinematic Dexterity of Robotic Mechanisms. International Journal of Robotics Research, 13(1):1-15P
- [50] <http://www.roboticsonline.com/>
- [51] <http://www.learnaboutrobots.com/>

攻读硕士学位期间发表的论文和取得的科研成果

- [1]. 孙志娟, 孟庆鑫, 吴健荣. 基于多体接触的水下夹桩器卡环连接结构设计.
工程设计学报(已录用)

致 谢

本论文的研究工作是在导师王立权教授的精心指导和亲切关怀下完成的，导师严谨的治学态度和执着的敬业精神以及实事求是的科学态度令我深深的敬仰，导师一直以来在学习和生活上给予我的无微不至的关怀令我难忘，在此向辛勤培育我的导师致以最真挚的谢意！

要特别感谢海洋智能机械研究所所长孟庆鑫教授，孟教授渊博的知识、敏锐的思维、一丝不苟的作风和高尚的人格修养，令我深感敬佩。从他身上我不仅学到了许多宝贵的理论知识和实践经验，而且学到了不少做人的道理和治学的态度。在此表示诚挚的谢意。

在本课题的研究工作中，孙荣华研究员、赵长发教授给予了我无私的帮助和诸多具体的指导，在此向两位老师表示衷心的感谢。

感谢同课题组的闫志超、王才东同学的通力合作。

在本论文的撰写过程中，作者还得到了唐德栋博士、王海波博士、俞志伟博士的热情帮助和支持，并在论文的细节方面获得了很多有益的建议和改进意见，在此表示由衷的感谢。

感谢海洋智能机械研究所的所有老师和同学在平时的生活和学习中对我的帮助，让我享受到集体的融洽和温暖，和大家在一起的这段美好时光将令我终生难忘。同时，还要特别感谢我多年的同窗好友金东杰、孙志娟、周雅杰、刘常伦等给予我的帮助，我们的友谊将是我一生最值得珍惜的财富。

向对论文进行评审、提出宝贵意见的各位专家表示真诚的感谢。

最后，向养育我的父母、向我亲爱的哥哥致以深深的谢意，是他们给了我力量和信心，让我有勇气和决心完成学业！