

摘要

随着中国加入世贸组织，国内的喷漆行业面临着一个非常严峻的问题，就是如何引进国外的先进技术提高生产率，其中就有喷漆机器人技术的引进和开发。在喷漆操作中产生的烟雾、有毒气体和灰尘等对人体的健康有影响，另一个原因是有些喷漆部位人很难进行操作或者根本不能操作，基于上述的原因国内的厂家迫切需要用喷漆机器人代替人进行喷漆作业。本次设计的“喷漆机器人”就是为了解决这些问题。该机器人不但能代替人在危险或有毒害的工作环境中稳定的工作，而且它又巧妙地解决了喷漆线中某些复杂部位的喷漆。它有五个自由度，运转灵活，手腕的两个自由度控制直接决定了喷漆的质量和效率。这次机器人的总体结构设计是机器人设计中重要的部分，它是根据生产中的实际问题而采取的有效方法，不仅具有理论研究价值，而且具有现实意义。它可以打开我国的机器人生产产品种规格多、批量小、零部件通用化程度低、供货周期长、成本高，而且质量、可靠性不稳定的僵局。

关键词：喷漆机器人；结构设计；大臂；小臂

Abstract

Following China joining in the WTO, spray-paint of industry in our country faces a machine for very rigorous problem whatever introduce into advanced technology to increase productivity , spray-paint robot technology's introduce into and open out. Smog 、 toxicant and dust affect God's image health in the course of the spray-paint, to all do harm to the human body to is some to spray-paint the part person very difficult proceeding operation or the root can't operate, base on upper reason that internal factory is a impendence thing that require to use spray-paint robot for replacing man to joining work. The design of the spray-paint robot aim to resolve these problem. It can not only replace the person at the work that dangerous or poisonous harm to inside steady, and it is again skillfully to resolve the spray-paint of some and complicated part of inside of spray-paint line. Two free degree controls that it have five free degrees, revolves is vivid, and the wrist come to a decision the wedding's quantity with the efficiency. The total construction design of robot of this Arc spray-paint is a Arc spray-paint robot the system inside is extremely important a the part, it is according to the valid method that actual problem within production and then adopt, and not only have the theories research the value, but also have the realistic meaning. it can open the deadlock of our country's robot's lots of variety standards, little of batch, lowness of part's general use, the long cycle of supply, the high cost, and that the quality and dependability is unsteadiness.

Keywords: Paint machine; structural design; big arm; forearm

目录

摘要	I
Abstract	II
第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 工业机器人的构成及分类	2
1.2.1 工业机器人的构成	2
1.2.2 机器人的分类	3
1.3 研究工业机器人的意义和目的	5
1.3.1 研究工业机器人的意义	5
1.3.2 研究工业机器人目的	8
第 2 章 喷漆机器人的方案设计	10
2.1 确定驱动系统	10
2.2 确定驱动机型和自由度	10
2.3 确定传动方式	11
2.4 确定运动杆长和各轴的运动范围	11
2.5 确定臂杆结构和平衡方式	12
第 3 章 喷漆机器人结构及传动系统设计	13
3.1 底座及腰部设计	13
3.1.1 腰部传动系统设计	13
3.1.2 箱体设计	25
3.2 大臂及小臂设计	26
3.2.1 大臂驱动部分的设计	26
3.2.2 小臂驱动部分的设计	35
3.2.3 选择减速器	37

3.2.4 同步带的设计计算	39
3.3 腕部设计	41
第 4 章 工业机器人的控制系统	43
4.1 控制特点与分级	43
4.1.1 工业机器人的控制有如下特点	43
4.1.2 机器人控制系统分级	44
4.2 运动控制方式	45
4.2.1 点位控制方式	45
4.2.2 连续轨迹控制方式	46
4.3 控制装置的软件系统	48
4.3.1 喷漆机器人软件系统	48
4.3.2 喷漆机器人喷漆系统	49
结论	50
致谢	51
参考文献	52

第 1 章 绪论

1.1 概述

工业机器人是工业制造及物流自动化中的重要装置之一，是当今世界新技术革命的一个重要标志。工业机器人是一种典型的机电一体化产品，它大体上分解为四个部分：机器人本体、末端执行器、传感器和控制器^[1]。在科技界，科学家会给每一个科技术语一个明确的定义，但机器人问世已有几十年，机器人的定义仍然仁者见仁，智者见智，没有一个统一的定义。原因之一是机器人还在发展，新的机型，新的功能不断涌现。根本原因主要是因为机器人涉及到了人的概念，成为一个难以回答的哲学问题。就像机器人一词最早诞生于科幻小说之中一样，人们对机器人充满了幻想。也许正是由于机器人定义的模糊，才给了人们充分的想象和创造空间。

而我国科学家对机器人的定义是：“机器人是一种自动化的机器，所不同的是这种机器具备一些与人或生物相似的智能能力，如感知能力、规划能力、动作能力和协同能力，是一种具有高度灵活性的自动化机器”^[2]。在研究和开发未知及不确定环境下作业的机器人的过程中，人们逐步认识到机器人技术的本质是感知、决策、行动和交互技术的结合。随着人们对机器人技术智能化本质认识的加深，机器人技术开始源源不断地向人类活动的各个领域渗透。结合这些领域的应用特点，人们发展了各式各样的具有感知、决策、行动和交互能力的特种机器人和各种智能机器，如移动机器人、微机器人、水下机器人、医疗机器人、军用机器人、空中空间机器人、娱乐机器人等。对不同任务和特殊环境的适应性，也是机器人与一般自动化装备的重要区别。这些机器人从外观上已远远脱离了最初仿人型机器人和工业机器人所具有的形状，更加符合各种不同应用领域的特殊要求，其功能和智能程度也大大增强，从而为机器人技术开辟出更加广阔的发展空间。

而人们一般对机器人作如下的定义：“机器人是一种自动控制的通过编程可完成某些手工操作或搬运作业的机器”。

机器人的产生和推广是社会生产和发展的需要，也是现代生产和科学发展的新技术产品。机器人已经在工业生产、资源开发、社会服务、排险救灾以及军事技术等方面发挥着愈来愈多的作用。机器人可以在有毒、噪声、高温、易燃、易爆等危险有害的环境中代替人长期稳定的工作，从根本上解决了操作者的安全保障问题。采用机器人更能够扩大人类的活动领域和能力。机器人可以在诸如深海、高压、辐射、外层空间等人类不能适应的条件下长期可靠的工作，因此在深海采矿、宇宙探索、卫星的空间维修、高辐射条件下调试等领域，都可以依靠机器人来操作。随着计算机技术、控制技术、人工智能的发展，机器人技术得到迅速发展，出现了更为先进的可配视觉、触觉的机器人。

1.2 工业机器人的构成及分类

1.2.1 工业机器人的构成

工业机器人由执行机构、驱动装置、控制系统、智能系统组成，其中构执行机构(也称操作机)是机器人赖以完成工作任务的实体，通常由杆件相关节组成。从功能的角度，执行机构可分为：手部、腕部、臂部、腰部和基座等。

1.手部

手部又称末端执行器，是工业机器人直接进行工作的部分和各种夹持器。有时人们也常把诸如电焊枪、油漆喷头等划作机器人的手部。

2.腕部

腕部与手部相连，通常有 3 个自由度，多为轮系结构，主要功用是带动手部完成预定姿态，是操作机中结构较为复杂的部分。

3.臂部

臂部用以连接腰部和腕部，通常由两个臂杆(小臂和大臂)组

成，用以带动胸部作平面运动。

4.腰部

腰部是连接管和基座的部件，通常是回转部件，腰部的回转运动再加上臀部的平面运动，就能使腰部作空间运动。腰部是执行机构的关键部件，它的制造误差、运动精度和平稳性，对机器人的定位精度有决定性的影响。

5.基座

基座是整个机器人的支持部分，有固定式和移动式两种。该部件必须具有足够的刚度和稳定性。

1.2.2 机器人的分类

我国的机器人专家从应用环境出发，将机器人分为两大类，即工业机器人和特种机器人。所谓工业机器人就是面向工业领域的多关节机械手或多自由度机器人。而特种机器人则是除工业机器人之外的、用于非制造业并服务于人类的各种先进机器人，包括：服务机器人、水下机器人、娱乐机器人、军用机器人、农业机器人、机器人化机器等。^[3]在特种机器人中，有些分支发展很快，有独立成体系的趋势，如服务机器人、水下机器人、军用机器人、微操作机器人等。目前，国际上的机器人学者，从应用环境出发将机器人也分为两类：制造环境下的工业机器人和非制造环境下的服务与仿人型机器人，这和我国的分类是一致的。

1.按机械手的几何结构分

机器人机械手的机械配置形式多种多样。最常见的结构形式是用其坐标特性来描述的。这些坐标结构包括笛卡儿坐标结构、柱面坐标结构、极坐标结构、球面坐标结构和关节式球面坐标结构等。这里简单介绍柱面、球面和关节式球面坐标结构等三种最常见的机器人。

柱面坐标机器人。柱面坐标机器人主要由垂直柱子、水平手臂(或机械手)和底座构成。水平机械手装在垂直柱子上，能自由伸缩，并可沿垂直柱子上下运动。垂直柱子安装在底座上，并与水平机械手

一起(作为一个部件)能在底座上移动。这样，这种机器人的工作包迹(区间)就形成一段圆柱面，如图 1-1 所示。因此，把这种机器人叫做柱面坐标机器人。

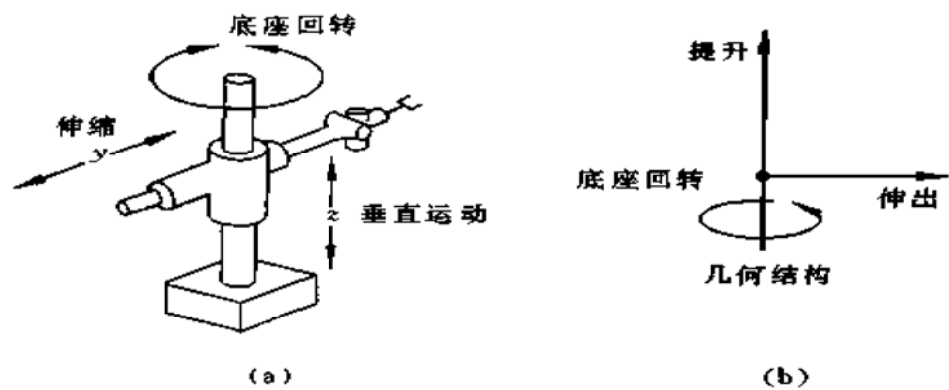


图 1-1 柱面坐标机器人

球面坐标机器人。这种机器人如图 1-2 示。它像坦克的炮塔一样。机械手能够作里外伸缩移动、在垂直平面上摆动以及绕底座在水平面上转动。因此，这种机器人的工作包迹形成球面的一部分，并被称为球面坐标机器人。

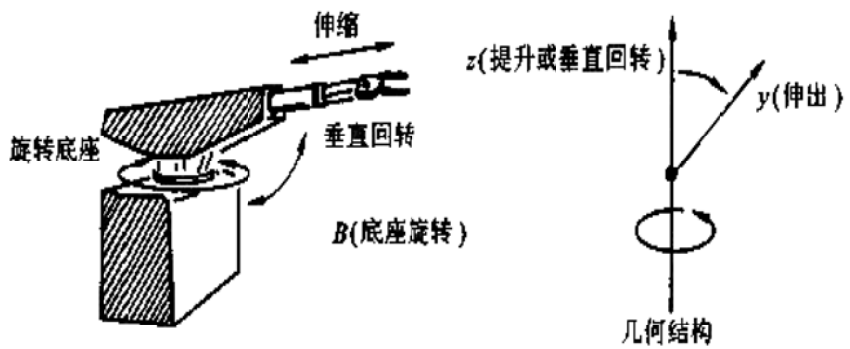


图 1-2 球面坐标机器人

关节式球面坐标机器人。这种机器人主要由底座(或躯干)、上臂和前臂构成。器人的工作包迹形成球面的大部分，称为关节式球面机器人^[10]。

2.按用途分

工业机器人按用途和作业类别划分，有焊接机器人、冲压机器人、浇注机器人、搬运机器人、装配机器人、喷漆机器人、切削加工机器人、检测机器人、采掘机器人、水下机器人等。

探索机器人，用于进行太空和海洋探亲，也可用于地面和地下探险和探索。

服务机器人，一种半自主或全自主工作的机器人，其所从事的服务工作可使人类生存得更好，使制造业以外的设备工作得更好。

军事机器人，用于军事目的，或进攻性的，或防御性的。它又可分为空中军用机器人、海洋军用机器人和地面军用机器人。^[4]

1.3 研究工业机器人的意义和目的

1.3.1 研究工业机器人的意义

近年来，国外工业机器人的发展非常迅速。据报导，目前世界上生产中使用的机械手和工业机器人总台数已达 15 万台，其中示教再现机器人已达 2.8 万台，特别突出的是日本，其工业机器人产值，在 79~82 四年中，连续以年增长 40% 的高速度发展，至 1982 年日本已拥有机械手和各种工业机器人 10 万台（即占世界的 2/3）。另据预测，在今后十年中，美国工业机器人（台数和产值）将会以几何级数增长。欧洲各国也在加快步伐进行机器人的研制和应用。

国外为什么要大力发展工业机器人？总体来说，是机器人的特点满足了社会生产的需要。现在对工业机器人的特点及其带来的经济、社会效益分述如下：

机器人对环境的适应性强，能代替人从事危险、有害的操作。在人无法接近的地方，或者在长时间工作对人体有害的场所，机器人都不受影响。只要根据工作环境条件进行合理设计，选用适合的材料和结构，工业机器人就可以在异常高温或低温，异常压力和有害气体、粉尘、放射线作用下，以及冲压、灭火等危险环境中胜任工作。如冶炼、锻造、铸造和热处理车间，温度可达几百度，即使

穿防护衣，戴防护面具、手套等，人也难以坚持工作。此外，在焊接操作中的弧光、高温烟雾和飞溅以及喷漆作用中的毒性有机溶剂等有害人体健康的场所，都需要采用工业机器人来操作。据不完全统计，1976年日本全国工伤事故人数共113万人，平均每30名工人中有1人，其中比较严重的，伤亡者共33.3万人，平均每100名工人有1人。此外，肺结核、白血症等职业病很多，成为严重的社会问题，急待企业积极采取措施加以解决。在这种背景下，日本产业构造审议机械情报产业部在咨询答复报告中强调，首先应当在工伤事故多的工种，即冲压、压铸、热处理等作业中，推广应用工业机器人^[7]。此外，在有放射性污染和爆炸危险的场所，也应使用机器人。

机器人能持久、耐劳，可以把人从繁重单调的劳动中解放出来，并能扩大和延伸人的功能。人在连续工作几小时以后，总会感到疲劳或厌倦，需要有一段休息的时间。而工业机器人可以不受工作时间和场所的限制，只要对它注意维护、检修，适当更换易损件就可以了。例如，在汽车总装配中，点焊和拧螺丝的工作量很大（一辆汽车有数百甚至上千个焊点），又由于采用传送带流水作业，如果由人来进行这些操作，就会紧张到喘气的时间都没有的程度。如果采用机械手或工业机器人，就可以把人从单调的紧张劳动中解放出来。另一方面，人一般只能搬运和本身体重大致相同的物体，而工业机器人（包括大型操作机）具有“钢筋铁臂”，结实耐用。若采用液压驱动，产生较大的输出力，则可以搬运重达几百公斤的大型炙热锻件。这就是说，工业机器人具有超越人体能力界限的机械和物理功能。正应为如此，机器人在宇宙和海洋开发中，也将会发挥重要的作用。在登月舱中装上宇航机器人，能深入宇宙空间，探索星球的奥秘。水下机器人可以探测海底矿藏，维修水下设备。这些一般都属于超纵型机器人，操作人员可以坐在远离机器人的安全地带，通过无线电对机器人的安全地带，通过无线电对机器人进行遥控。

机器人动作准确性高，可保证稳定和提高产品质量。工业机器人不像人那样，容易受精神和生理因素的影响，它不会因为紧张、马虎、疲劳或视觉差等原因引起失误。也就是说，工业机器人可以避免人为操作上的错误，而按照设计精确度（如重复定位精度）保

证动作的准确性，从而保证产品质量稳定。对于一些技术要求较高、难度较大的作业，采用机器人也可以保证产品质量，提高生产效率。目前，装配机器人定位精度可高达 $0.02\sim 0.05\text{mm}$ ，这是人所不能及的。据日本报导，日本的精密装配机器人可以进行深度 30mm 、配合间隙在 10μ 以下的轴孔配合。若采用触觉反馈和柔性手腕，允许轴心位置有较大的偏离 (5mm)，也能自动补偿，准确装入零件。作业时间仅需 4s ，甚至更短。又如焊接机器人可以保证焊枪准确定位，能自动跟踪焊缝，进行连续轨迹和运动速度的控制，保证厚板复杂工件的焊接质量。

有些精密产品，如大规模集成电路装配等，如不采用机器人等自动化设备，而用手工操作，不能保证产品质量要求。

机器人通用性灵活性好，能适应产品品种迅速变化的要求，满足柔性生产的需要。现代社会用户对产品的要求不仅是数量上不断增长，更重要的是对品种规格的要求多样化，而且是层出不穷，不断发展。这就迫使制造厂必须不断改进产品，增加花色品种，以满足用户的各种需求，否则，就有在市场竞争中被淘汰的危险。

工业机器人由于动作程序和运动位置（或轨迹）可灵活改变，又有较多的运动自由度，能够迅速改变作业内容，满足生产要求，因此，特别使用于产品改型、品种变化以及多品种混合生产线的场合。例如在制造汽车车身点焊点数变化，还是在同一条线上多中车型混合生产的情况，工业机器人都能适应。

工业机器人作为小批或中批量生产自动化工具最能发挥效用，它担任材料装卸和搬运工作。在更换不同种类零件时，调整既快又容易。在多品种零件加工的柔性生产系统中，工业机器人起着重要的作用。日本从 1980 年以后慢慢转向多品种中小批量生产方式，而工业机器人正是迎合这一需要，从 1980 年进入普及应用阶段。因此，日本人称 1980 年为“工业机器人普及元年”。

日本近年来提出了“3A”革命的口号。“3A”就是指工厂自动化（FA）、办公室自动化（OA）和家庭自动化（HA）。在工厂自动化中一个重要内容就是发展柔性制造系统（FMS）。它是由多台与电子计算机直接相连的数控机床、机器人、搬运小车和自动化仓库组成，通过接口进行数值控制，是一种具有灵活性的自动化生产线，它可

实现多品种中等批量生产自动化。

采用工业机器人后可明显提高劳动生产率和降低成本。例如，日本山崎机械公司采用 18 个机器人与数控机床加工单元组成的生产精密机床的自动化系统，由中央计算机控制全部生产过程，30 天就能完成过去（未采用机器人时）三个月的生产任务，两年内即可收回全部投资 1800 美元。美国通用电气公司为某机车制造厂制造的柔性加工系统，生产效率提高 15 倍。日本富士电机公司建成的电机厂，每月生产伺服电机、主轴电机等一万台，采用机器人后，生产效率提高 5 倍。

采用机器人可以节省材料和能源消耗，这一点也是很清楚的。例如在喷漆中可以防止漆雾的飞溅，减少涂料损失（一般可节约油漆 20%~30%），同时也节约了空调的能耗。又如，在轧钢过程中，如果人工进行开坯初轧去除表面缺陷的工作时，需要把钢坯温度由 1200° 冷却到 400°，而在热轧时还要再将坯料加热到 1200°，无形中多耗费了大量热能。而用机器人去除缺陷，则不需要降温 and 重新升温的过程，因此显著节省了能耗。

另一方面，当采用专用自动机时，如果产品改型，就要增加大量改造费用和时间。如果采用通用数控机床配以机器人，便可通过改变工作程序的方法，容易地得到解决，节省了费用和时间。

产品质量的提高带来了可观的经济效果。如日本先驱者电子公司采用 100 台机器人装电子线路板，由于产品质量稳定和提高，不合格率明显下降，生产成本降低了 75%。

除上述社会经济因素外，工业机器人的发展，还与电子技术和微型计算机等控制技术的进步有关。由于这些技术的采用以及机器人技术的不断改进，机器人产品的性能、功能及可靠性都得到了提高，而且成本下降，从而促进了工业机器人的推广应用。

1.3.2 研究工业机器人目的

由于喷漆造成空气中有大量的化学物质气体和悬浮颗粒，因而对人的身体极为有害。尽管采取劳动保护措施和营养补助，但它对

人体的损害是难以改变的事实。我国从事喷涂业的人数超过 30 万，全世界在这种岗位上的人就更多了。如何解决这个问题呢？人们自然想到了喷漆的自动化和喷漆机器人。

采用喷漆机器人不但可以改善劳动环境，而且提高了产品的质量 and 稳定性，减少了废品的数量，降低了漆量和能量的消耗，提高了劳动生产率。尤其当机器人对外形复杂的产品进行喷漆时，不会造成任何遗漏，也不会出现喷得厚薄不匀的现象，因为喷漆的角度、部位、时间、轨迹等，都早已在计算机中规定好了。随着现代产品更注重个性化发展，汽车除了色彩不同外，还要求有不同的图案，这样，用机器人按照图案编程和自动换色来喷漆，将有着极大的优越性。这样的机器人不愧为多采的喷漆匠。

可以想见，更多的“多彩的喷漆匠”将帮助人类从那些有害的工作环境中解脱出来，更好地装点人类多彩的空间。

第 2 章 喷漆机器人的方案设计

2.1 确定驱动系统

工业机器人的驱动系统是直接驱动整个运动部件动作的机构，对工业机器人的性能和功能影响很大。如果没有有效的伺服驱动系统，无论机器人具有多么高的智慧和优越的传感系统，也是无济于事的。

工业机器人的动作自由度多，运动速度较快，驱动元件本身大多是安装在活动机架上的。这些特点要求工业机器人驱动系统的设计必须做到外型小、重量轻、工作平稳可靠。另外，由于工业机器人能任意多点定位，工作程序又灵活多变，所以在一些比较复杂的机器人中，通常采用伺服系统。

目前，工业机器人的驱动方式主要有液压、电动、气动三种。电动驱动方式具有以下特点：动力源简单、负荷较小、速度低、无需配管、维修使用方便、使用寿命长。此外，由于近年来采用新型磁性材料，伺服电机的特性得到提高，同时又研制出采用电子线路的稳定性好、效率高的电驱动方式。这种驱动方式和控制系统信号一致，又便于和计算机连接，能实现精密控制，可适用于程序复杂、运动轨迹要求严格的工业机器人。因此，综合考虑后决定采用电动驱动方式。

2.2 确定驱动机型和自由度

工业机器人的操作机有多种类型，因关节型机器人有许多的优点，且结构设计简单，对于这次喷漆机器人的设计决定采用关节型设计，又因喷漆机器人的负荷较小，速度低，通常 5 个自由度即可进行工作，因此采用 5 自由度的关节型机器人。

2.3 确定传动方式

齿轮传动是机械传动中最重要的传动之一，形式很多，应用广泛，传递的功率可达近十万千瓦，圆周速度可达 200m/s。因此本次喷漆机器人的设计中可以采用齿轮传动(圆柱—圆柱齿轮,或圆锥—圆柱齿轮传动)的形式。

齿轮传动还有以下特点：

效率高 在常用的机械传动中，以齿轮传动的效率为最高。如一级圆柱齿轮传动的效率可达 99%。这对大功率传动十分重要，因为即使效率只提高 1%，也有很大的经济意义。

结构紧凑 在同样的使用条件下，齿轮传动所需的空间尺寸一般较小。液压传动虽然功率较大，但体积也较齿轮传动大，且液压传动的制造成本较贵，对于本次喷漆机器人，由于所负载的重量不大，且需要的体积尽可能小。当然，对于气动传动方式来说，虽然体积较小，但由于它的传动精度不高，传动不易控制，故在这里不考虑它。

工作可靠、寿命长 设计制造正确合理、使用维护良好的齿轮传动，工作十分可靠，寿命可达一、二十年，这也是其他传动形式不能比拟的。尤其是对于本次的喷漆机器人，因它的工作环境恶劣（在喷漆环境，温度较高，空气污染严重等），故采用齿轮传动是最佳的方案。

传动比稳定 传动比的稳定直接影响了喷漆机器人的传动性能，因此它需要有较高的精度，末端位置的控制完全由他的传动性能来决定的。

2.4 确定运动杆长和各轴的运动范围

经过参考多本参考资料的查看，和机器人作业场所和空间的需要，一般在汽车喷漆流水线中的机器人末端执行器的工作位置决定了机器人自身的臂长。在这里可以采取如下方式

腰部高为 0.65m

大臂有效长度为 0.60m（大臂关节到小臂关节的距离）

小臂有效长度为 0.60m（小臂关节到手腕的距离）

各部分的运动范围采取如下方案：

腰回转为 $-150^{\circ} \sim +150^{\circ}$

大臂摆动为 $-45^{\circ} \sim +90^{\circ}$

小臂摆动为 $-240^{\circ} \sim +60^{\circ}$

腕摆动为 $-105^{\circ} \sim +105^{\circ}$

腕部回转为 $-255^{\circ} \sim +225^{\circ}$ 最大负荷 6kg.

此机器不仅能用于喷漆作业，还可以用于搬运和装配作业。

2.5 确定臂杆结构和平衡方式

一般操作机有 5 个较复杂的结构件,即：底座、腰转台支架、大臂杆、小臂杆和腕部。大、小臂杆的结构目前较流行的是中间有多层圆筒形套装梁结构，外形象哑铃，多为焊铸件组合结构。还有就是箱形结构，就整体来说是比较复杂的箱体，多用铸件。为了减轻整机的重量，特别是为了降低 J_2 、 J_3 关节的力矩，大小臂多用轻合金铝铸件。

臂杆的平衡：为了减小驱动力矩和增加运动的平稳性，大小臂杆原则上说都要进行平衡。但当负载较小，臂杆的重量较轻，关节力矩不大，驱动装置有足够的容量时，可以省去平衡装置。对于大负荷（ $\geq 3\text{kg}$ ）臂杆（ $\geq 30\text{kg}$ ），大都设有平衡装置，这次设计就需要有平衡装置。对于喷漆机器人的设计，由于末端执行器（喷枪）的重量约为 6kg，臂杆（包括大臂和小臂的总重）约为 60kg，因此决定采取一定的平衡措施：小臂杆的平衡：小臂杆通常采用结构自平衡和重块平衡两种方式。所谓的结构自平衡，就是配置的腕部驱动和传动装置尽量放在关节旋转轴 的两边，以达到对关节的重力平衡。哑铃状上臂，就是较好的起到了这一作用。但如果臂杆的后部长度（无效长度）太长，不利于机器人在狭窄环境中工作，所以单采用自平衡对大负荷操作机还很难取得满意的结果..

第 3 章 喷漆机器人结构及传动系统设计

3.1 底座及腰部设计

3.1.1 腰部传动系统设计

腰身高为 0.65m

腰部总负载（初步估算）约为 60kg

旋转力矩 T 为： $T=150\text{N}$ （估计）

$$p = T \times n / 9550 = 0.236 \text{ kW} \quad (n=15 \text{ r/min})$$

根据机械设计手册中查得可以选择伺服电机如下：

电机型号	110SZ59	额定功率	0.4 kW
额定转距	1.274 N·m	额定转速	3000r/min
质量	7.6kg		

按推荐的传动比的合理范围，一级开式圆柱齿轮的传动比为 3~7，圆柱—圆锥齿轮的传动比为 10~25，因此两级齿轮总传动比的合理范围为 $i=30\sim 175$ ，而选定的工作转速最大为 15r/min 电机转速为 3000r/min 传动比为 $i=200$ ，所以采用 3 级齿轮传动。

1. 传动比分配

根据传动比从小到大的原则，一级开式圆柱齿轮的传动比为 3~7，取 $i_1=4$ ，分配如下：

$$i = i_1 \cdot i_2 \cdot i_3 = 4 \times 6 \times 8.33 = 200$$

各轴转速

$$n_1 = 3000 \text{ r/min}$$

$$n_2 = \frac{3000 \text{ r/min}}{4} = 750 \text{ r/min}$$

$$n_3 = \frac{750 \text{ r/min}}{6} = 125 \text{ r/min}$$

$$n_4 = \frac{125 \text{ r/min}}{8.33} = 15 \text{ r/min}$$

2.各轴输入功率

轴承效率 $\eta_r=0.98$,

齿轮效率 $\eta_g=0.98$,

交叉滚子轴承效率 $\eta_{r'}=0.98$

$$P_I = P_d \eta_{01} = 0.4 \times 0.99 = 0.396 \text{ kW}$$

$$P_{II} = P_d \eta_{12} = 0.380 \text{ kW}$$

$$P_{III} = P_d \eta_{23} = 0.365 \text{ kW}$$

$$P_{IV} = P_d \eta_{34} = 0.350 \text{ kW}$$

3.各轴的输入转距

$$T_d = 9550 \frac{P_d}{n_m} = 9550 \times \frac{0.4}{3000} = 1.273 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_1 = 9550 \cdot P_I / n_1 = 1.261 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_2 = 9550 \cdot P_{II} / n_2 = 4.839 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_3 = 9550 \cdot P_{III} / n_3 = 27.886 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_4 = 9550 \cdot P_{IV} / n_4 = 222.833 \text{ N} \cdot \text{m}$$

4.第一级齿轮传动

(1) 选择材料

小齿轮材料为 40Cr, 调质处理, 硬度为 HBS280, 大齿轮材料为 45 钢, 硬度为 HBS240, 二者材料硬度相差 HBS40。

选小齿轮的齿数 $Z_1=30$, 大齿轮的齿数 $Z_2=30 \times 4=120$ 。

(2) 设计计算

按齿面接触疲劳强度设计, 设计计算公式如下:

$$d_1 \geq \sqrt[3]{\frac{2K_t T_1}{\phi_d} \cdot \frac{u \pm 1}{u} \cdot \left(\frac{Z_E}{[\sigma_H]}\right)^2} \quad (3-1)$$

式中 K_t ——载荷系数;

T_1 ——转矩;

u ——传动比;

Z_E ——弹性模量;

ϕ_d ——齿宽系数;

$[\sigma_H]$ ——许用应力 (MPa);

确定公式内的各计算值

试选载荷系数 $K_t=1.3$

齿宽系数 $\phi_d = 1$

弹性系数 $Z_E=189.8\text{MPa}$

小齿轮接触疲劳强度极限 $\sigma_{Hlim1}=600\text{MPa}$

大齿轮接触疲劳强度极限 $\sigma_{Hlim2}=550\text{MPa}$

计算循环应力次数

$$N_1=60n_1jL_h=60\times 3000\times 1\times 8\times 300\times 15=6.48\times 10^9$$

$$N_2=60n_2jL_h=60\times 750\times 1\times 8\times 300\times 15=1.62\times 10^9$$

取接触疲劳寿命系数 $K_{HN1}=0.90$ $K_{HN2}=0.95$

失效概率为 1%，安全系数 $S=1$

$$[\sigma_H]_1 = K_{HN}\sigma_{Hlim1}/S=0.9\times 600=540 \text{ MPa}$$

$$[\sigma_H]_2 = K_{HN}\sigma_{Hlim2}/S=0.9\times 600=540 \text{ MPa}$$

将上述各值代入公式(3-1)得

$$d_1 \geq \sqrt[3]{\frac{2KT_1}{\phi_d} \cdot \frac{u \pm 1}{u} \cdot \left(\frac{Z_H \times Z_E}{[\sigma_H]}\right)^2} = 12.92\text{mm} \quad \text{为安全起见可适当放大取}$$

$$d_1=30\text{mm}$$

$$\text{验算圆周速度 } \frac{\pi d_1 n_1}{60 \times 1000} = 4.14\text{m/s}$$

$$\text{计算齿宽 } b=\sigma_d \cdot d_{1t}=1 \times 30=30$$

求载荷系数：

使用系数 $K_A=1.25$ ；动载系数 $K_V=1.1$ (假定 $V=3 \sim 8\text{m/s}$)；齿间载荷分配系数 $K_\alpha=1.2$ ；齿向载荷分配系数 $K_\beta=1.4$ 。

$$\therefore K=K_A K_V K_\alpha K_\beta=2.31$$

按实际载荷系数校核多的分度圆直径

$$d_1 = \sqrt[3]{\frac{K}{K_t}} d_{1t} = 28.6\text{mm}$$

$$\text{计算模数 } m=d_1/Z_1=28.6/30=0.95$$

按弯曲疲劳强度进行校核，计算公式如下

$$m \geq \sqrt[3]{\frac{2KT_1}{\phi_d Z_1^2} \left(\frac{Y_{Fa} Y_{Sa}}{[\sigma_F]} \right)} \quad (3-2)$$

式中 K ——载荷系数；

T_1 ——转矩（N•m）；

Y_{Fa} ——齿形系数；

Y_{Sa} ——应力校正系数；

ϕ_d ——齿宽系数；

Z_1 ——齿数；

$[\sigma_F]$ ——许用接触应力(MPa)；

确定公式内的各计算值

查表得 小齿轮的弯曲疲劳强度 $\sigma_{FE1}=500\text{MPa}$

大齿轮的弯曲疲劳强度 $\sigma_{FE2}=380\text{MPa}$

弯曲疲劳寿命系数 $K_{FN1}=0.85$ $K_{FN2}=0.88$

取弯曲疲劳安全系数 $S=1.4$,则

$$[\sigma_F]_1 = K_{FN1} \sigma_{FE1} / S = 0.85 \times 500 \div 1.4 = 303.57 \text{MPa}$$

$$[\sigma_F]_2 = K_{FN2} \sigma_{FE2} / S = 0.88 \times 380 \div 1.4 = 238.86 \text{MPa}$$

$$K = K_A K_V K_\alpha K_\beta = 2.31$$

查取齿形系数

$$Y_{Fa1}=2.65 \quad Y_{Fa2}=2.226$$

查取应力校正系数

$$Y_{Sa1}=1.58 \quad Y_{Sa2}=1.764$$

计算大、小齿轮 $Y_{Fa} Y_{Sa} / [\sigma_F]$ 并加以比较

$$Y_{Fa1} Y_{Sa1} / [\sigma_F]_1 = 2.65 \times 1.58 \div 303.57 = 0.01379$$

$$Y_{Fa2} Y_{Sa2} / [\sigma_F]_2 = 2.226 \times 1.764 \div 238.86 = 0.01644$$

将上述结果代入公式 3-2 得

$$m \geq \sqrt[3]{\frac{2 \times 2.31 \times 1261}{1 \times 30^2} \times 0.01644} = 0.473 \text{mm}$$

对比计算结果，由齿面接触疲劳强度计算的模数大于由齿根弯曲疲劳强度计算的模数，故取 $m=1$ 并算出小齿轮的齿数为

$$Z_1 = d_1 / m = 28.6 \div 1 = 28.6$$

$$\text{取 } Z_1=30 \quad Z_2=30 \times 4=120$$

计算分度圆直径

$$d_1=Z_1m=30 \times 1=30\text{mm}$$

$$d_2=Z_2m=120 \times 1=120\text{mm}$$

计算中心距

$$a=(d_1+d_2)/2=(30+120)/2=75\text{mm}$$

计算齿轮宽度

$$b=\Phi_d d_1=1 \times 30=30\text{mm}$$

$$\text{取 } B_2=30\text{mm} \quad B_1=35\text{mm}$$

5. 第二级齿轮传动

(1) 选择材料

小齿轮材料为 40Cr，调质处理，硬度为 280HBS，大齿轮材料为 45 钢，硬度为 240HBS，二者材料硬度相差 40HBS。

$$\text{选小齿轮的齿数 } Z_1=17 \quad \text{大齿轮的齿数 } Z_2=17 \times 6=102$$

(2) 设计计算

按齿面接触疲劳强度设计，计算公式为（3-1）

确定公式内的各计算值

试选载荷系数 $K_t=1.3$

齿宽系数 $\phi_d=1$

弹性系数 $Z_E=189.8\text{MPa}$

小齿轮接触疲劳强度极限 $\sigma_{Hlim1}=600\text{ MPa}$

大齿轮接触疲劳强度极限 $\sigma_{Hlim2}=550\text{ MPa}$

计算循环应力次数

$$N_1=60n_1jL_h=60 \times 750 \times 1 \times 8 \times 300 \times 15=1.62 \times 10^9$$

$$N_2=60n_2jL_h=60 \times 125 \times 1 \times 8 \times 300 \times 15=1.7 \times 10^8$$

$$\text{取接触疲劳寿命系数} \quad K_{HN1}=0.90 \quad K_{HN2}=0.95$$

失效概率为 1%，安全系数 $S=1$

$$[\sigma_H]_1=K_{HN}\sigma_{Hlim1}/S=0.9 \times 600=540\text{ MPa}$$

$$[\sigma_H]_2=K_{HN}\sigma_{Hlim2}/S=0.9 \times 600=540\text{ MPa}$$

计算工作载荷

$$T_1=9.55 \times 10^6 \times P_2/n_2=4839\text{N} \cdot \text{mm}$$

初步求小齿轮直径

将上述各值代入公式（3-1）

$$d_1 \geq \sqrt[3]{\frac{2KT_1}{\phi_d} \cdot \frac{u \pm 1}{u} \cdot \left(\frac{Z_E}{[\sigma_H]}\right)^2} = 19.32\text{mm}$$

$$\text{验算圆周速度: } V = \frac{\pi d_1 n_1}{60 \times 1000} = 0.98\text{m/s}$$

计算齿宽

$$b = \sigma_d \cdot d_{1t} = 1 \times 30 = 30\text{mm}$$

求载荷系数:

$$K = K_A K_V K_\alpha K_\beta$$

使用系数 $K_A = 1.25$; 动载系数 $K_V = 1.1$ (假定 $V = 3 \sim 8\text{m/s}$) ; 齿间载荷分配系数 $K_\alpha = 1.2$; 齿向载荷分配系数 $K_\beta = 1.4$;

$$K = 1.25 \times 1.1 \times 1.2 \times 1.4 = 2.31$$

按实际载荷系数校核多的分度圆直径

$$d_1 = \sqrt[3]{\frac{K}{K_t}} d_{1t} = (2.31 \times 19.32 \div 1.3)^{1/3} = 23.184\text{mm}$$

$$\text{计算模数 } m = d_1/z_1 = 23.184/17 = 1.36$$

取 $m = 1.5$

(3)确定传动尺寸

仿照第一级齿轮传动的计算过程得到该齿轮传动结构的有关尺寸见表 3-1

表 3-1 第二级齿轮参数表

	Z_1	Z_2
齿数	17	102
分度圆直径 (mm)	25.5	153
齿顶圆直径 (mm)	28.5	156
齿根圆直径 (mm)	21.5	149.5
齿宽 (mm)	30	25
压力角 (°)	20	

续		
	Z_1	Z_2
模数	15	
中心距	89.25	

6.第三级齿轮传动

(1)选择材料

小齿轮材料为 40Cr，调质处理，硬度为 280HBS,大齿轮材料为 45 钢，硬度为 240HBS，二者材料硬度相差 40HBS。

选小齿轮的齿数 $Z_1=17$ ，大齿轮的齿数 $Z_2=17 \times 8.33=141.6 \approx 142$

(2)设计计算

按齿面接触疲劳强度设计，计算公式为(3-1)

确定公式内的各计算值

试选载荷系数 $K_t=1.3$

齿宽系数 $\phi_d = 0.6$

弹性系数 $Z_E=189.8\text{MPa}$

小齿轮接触疲劳强度极限 $\sigma_{Hlim1}=600\text{ MPa}$

大齿轮接触疲劳强度极限 $\sigma_{Hlim2}=550\text{ MPa}$

计算循环应力次数

$$N_1=60n_1jL_h=60 \times 125 \times 1 \times 8 \times 300 \times 15=1.7 \times 10^8$$

$$N_2=60n_2jL_h=60 \times 15 \times 1 \times 8 \times 300 \times 15=2.04 \times 10^7$$

取接触疲劳寿命系数 $K_{HN1}=0.93$ $K_{HN2}=0.96$

失效概率为 1%，安全系数 $S=1$

$$[\sigma_H]_1 = K_{HN}\sigma_{Hlim1}/S=0.93 \times 600=558\text{MPa}$$

$$[\sigma_H]_2 = K_{HN}\sigma_{Hlim2}/S=0.96 \times 600=576\text{ Mpa}$$

计算工作载荷

$$T_1=9.55 \times 10^6 \times P_{\text{III}}/n_3=27886\text{N} \cdot \text{Mmm}$$

初步求小齿轮直径

将上述各值代入公式（3-1）有

$$d_1 \geq \sqrt[3]{\frac{2KT_1}{\phi_d} \cdot \frac{u \pm 1}{u} \cdot \left(\frac{Z_E}{[\sigma_H]}\right)^2} = 32.98\text{mm}$$

验算圆周速度： $V = \frac{\pi d_1 n_1}{60 \times 1000} = 0.62\text{m/s}$

计算齿宽

$$b = \sigma_d \cdot d_{1t} = 1 \times 32.98 = 32.98\text{mm}$$

求载荷系数：

$$K = K_A K_V K_a K = 1.25 \times 1.1 \times 1.2 \times 1.4 = 2.31$$

按实际载荷系数校核多的分度圆直径

$$d_1 = \sqrt[3]{\frac{K}{K_t}} d_{1t} = (2.31 \times 32.98 \div 1.3)^{1/3} = 31.82\text{mm}$$

计算模数 $m = d_1 / z_1 = 31.82 / 17 = 2.24$

取 $m = 2.5$ 。

(3) 确定传动尺寸

同样仿照第一级齿轮传动的计算过程得到该齿轮传动结构的有关尺寸见表 3-2。

表 3-2 第三级齿轮参数表

	Z_1	Z_2
齿数	17	142
中心距 (mm)	89.25	
分度圆直径 (mm)	42.5	355
齿顶圆直径 (mm)	48.75	361.25
齿根圆直径 (mm)	37.5	350

7. 各齿轮轴的设计

(1) 轴 I 的设计

选择材料、确定许用应力轴的材料 45 钢，调质处理， $\sigma_B = 650\text{MPa}$
 $\sigma_S = 360\text{MPa}$ $\sigma_{-1} = 300\text{MPa}$ $\tau_{-1} = 155\text{MPa}$

许用应力： $[\sigma_{+1}] = 220\text{MPa}$ $[\sigma_{-1}] = 60\text{MPa}$

轴 I 的受力分析

小齿轮直径 $d_1 = 30\text{mm}$

大齿轮直径 $d_2=120\text{mm}$
 轴传递功率 $P_1=0.396\text{kW}$
 轴的转速 $n_1=3000\text{r/min}$
 轴的转距 $T=9.55 \times 10^6 \times \frac{P_1}{n_1} = 1260.6\text{N} \cdot \text{m}$
 齿轮的圆周力 $F_t = 2T / d_1 = 84.04\text{N}$
 齿轮的径向力 $F_r = F_t \cdot \tan \alpha = 30.6\text{N}$
 45 钢的材料系数 $A=107$

$$\text{则有 } d_1 \geq A \sqrt[3]{\frac{P_1}{n_1}} = 107 \times \sqrt[3]{\frac{0.396}{3000}} = 6.85\text{mm}$$

考虑到轴上有键槽等因素可取轴的最小直径 $d_1=10\text{mm}$ ，同时也是为了配套查找标准件的方便。

(2) 轴 II 的设计

选择材料、确定许用应力轴的材料选 45 钢，调质处理， $\sigma_B=650\text{MPa}$
 $\sigma_S=360\text{MPa}$ $\sigma_{-1}=300\text{MPa}$ $\tau_{-1}=155\text{MPa}$ 。

许用应力： $[\sigma_{+1}]=220\text{MPa}$ $[\sigma_{-1}]=60\text{MPa}$

轴的受力分析

大齿轮直径： $d_1=120\text{mm}$
 小齿轮直径： $d_2=25\text{mm}$
 轴传递功率： $P_2=0.380\text{kW}$
 轴的转速： $n_2=750\text{r/min}$
 轴的转距： $T=9.55 \times 10^6 \times \frac{P_2}{n_2} = 4838.7\text{N} \cdot \text{mm}$
 大齿轮的圆周力： $F_{t1} = 2T / d_1 = 80.65\text{N}$
 大齿轮的径向力： $F_{r1} = F_{t1} \cdot \tan \alpha = 29.4\text{N}$
 小齿轮的圆周力： $F_{t2} = 2T / d_2 = 387\text{N}$
 小齿轮的径向力： $F_{r2} = F_{t2} \cdot \tan \alpha = 140.86\text{N}$
 估计轴的最小直径 ($A=107$)

$$d_1 \geq A \sqrt[3]{\frac{P_2}{n_2}} = 107 \times \sqrt[3]{\frac{0.380}{750}} = 8.5 \text{ mm}$$

考虑到轴上有键槽等因素,取轴的最小直径为 $d_1=12\text{mm}$ 。

(3) 根据轴的结构进行弯距和扭距的分析如图 3-1。

竖直面反力 R_{HA} 和 R_{HB}

$$R_{HA} = \frac{F_{t2}(l_2 + l_3) - F_{r1}l_3}{l} = 273.85 \text{ N}$$

$$R_{HB} = F_{t2} - F_{r2} - R_{HA} = 83.75 \text{ N}$$

对于竖直面的弯距:

对于剖面 C: $M_{HC} = R_{HA} \times l_1 = 12049.4 \text{ N} \cdot \text{mm}$

对于剖面 D: $M_{HD} = R_{HB} \times l_3 = 4355 \text{ N} \cdot \text{mm}$

水平面反力 R_{VA} 和 R_{VB}

$$R_{VA} = \frac{F_{r2}(l_2 + l_3) - F_{t1}l_3}{l} = 73.89 \text{ N}$$

$$R_{VB} = F_{t1} + R_{VA} - F_{r2} = 13.68 \text{ N}$$

对于水平面的弯距:

对于剖面 C: $M_{VC} = R_{VA}l_1 = 3251.16 \text{ N} \cdot \text{mm}$

对于剖面 D: $M_{VD} = R_{VB}l_3 = 711.36 \text{ N} \cdot \text{mm}$

合成弯距: $M_C = \sqrt{M_{HC}^2 + M_{VC}^2} = 12480.3 \text{ N} \cdot \text{mm}$

$$M_D = \sqrt{M_{HD}^2 + M_{VD}^2} = 4412.71 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

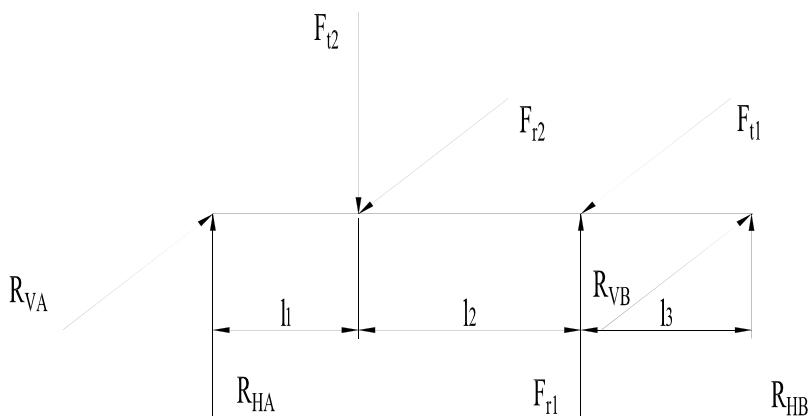


图 3-1 轴 II 受力分析图

根据以上数据得出截面 D 处的弯距最大，计算应力为：

$$\sigma_{ca} = \frac{M_D}{0.1d^3} = 1.35 \text{MPa} < [\sigma_{-1}]$$

从而得到结论：轴的弯曲强度符合条件。其弯矩图见图 3-2

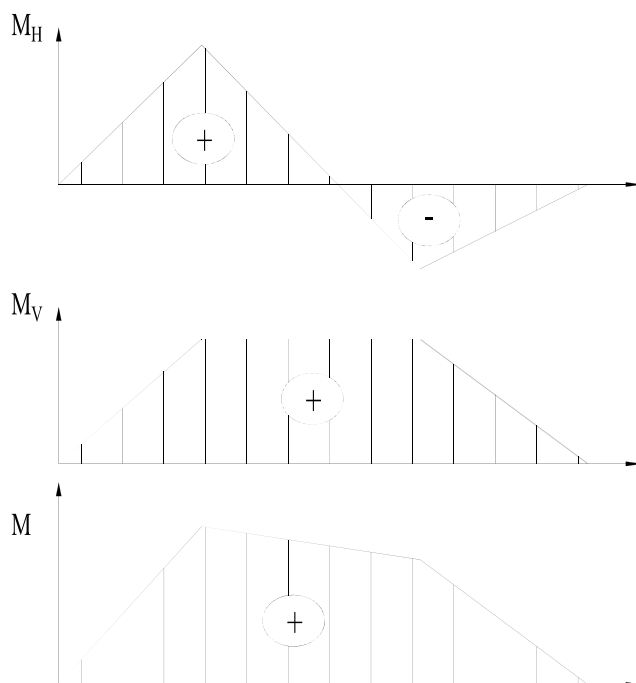


图 3-2 轴 II 弯矩图

(4) 轴III的设计

选择材料、确定许用应力轴的材料选 45 钢，调质处理， $\sigma_B=650\text{MPa}$
 $\sigma_S=360\text{MPa}$ $\sigma_{-1}=300\text{MPa}$ $\tau_{-1}=155\text{MPa}$

许用应力： $[\sigma_{+1}]=220\text{MPa}$ $[\sigma_{-1}]=60\text{MPa}$

轴的受力分析

大齿轮直径： $d_1=40\text{mm}$

小齿轮直径： $d_2=150\text{mm}$

轴传递的功率： $P_1=0.365\text{kW}$

轴的转速： $n_1=125\text{r/min}$

轴的转矩： $T=9.55 \times 10^6 P_1 / n_1 = 27886\text{N} \cdot \text{mm}$

小齿轮的圆周力： $F_{t1}=2T/d_1=1394.3\text{N}$

小齿轮的径向力： $F_{r1}=F_{t1} \cdot \tan \alpha = 507.5\text{N}$

大齿轮的圆周力： $F_{t2}=2T/d_2=371.8\text{N}$

大齿轮的径向力： $F_{r2}=F_{t2} \cdot \tan \alpha = 135.3\text{N}$

估计轴的最小直径 ($A=107$)

$$d_1 \geq A_3 \sqrt[3]{\frac{P_3}{n_3}} = 107 \times 3 \sqrt[3]{\frac{0.365}{125}} = 16.35\text{mm}$$

考虑到轴上有键槽等因素,取轴的最小直径为 $d_1=20\text{mm}$

(5) 轴IV的设计

由于此中间要加传输线路所以最好设计成中间空心轴。选择材料为 45 钢，调质处理， $\sigma_B=650\text{MPa}$ $\sigma_S=360\text{MPa}$ $\sigma_{-1}=300\text{MPa}$ $\tau_{-1}=155\text{MPa}$

许用应力： $[\sigma_{+1}]=220\text{MPa}$ $[\sigma_{-1}]=60\text{MPa}$

因为一般在载荷相同的情况下，空心轴的重量只为实心轴 $1/3 \sim 1/2$ ，可以大大减轻重量，节约材料。因为横截面上的剪应力沿规律分布，圆心附近的应力很小，材料没有充分发挥作用若把轴心附近的材料向边缘移置，使其成为空心轴，就会增大 I_P 和 W_t 提高轴的强度。

$$d \geq A_3 \sqrt[3]{\frac{P}{n(1-\gamma^4)}} \quad (3-3)$$

式中 n ——转速(r/min);

P ——功率(Kw);

γ ——内外径之比;

其中取 $n=15\text{r/min}$; $P=0.35\text{Kw}$; $\gamma=0.9$

将上述各值代入 (3-3) 得 $d \geq 44.65\text{mm}$, 取轴的最小直径为 $d=50\text{mm}$ 。

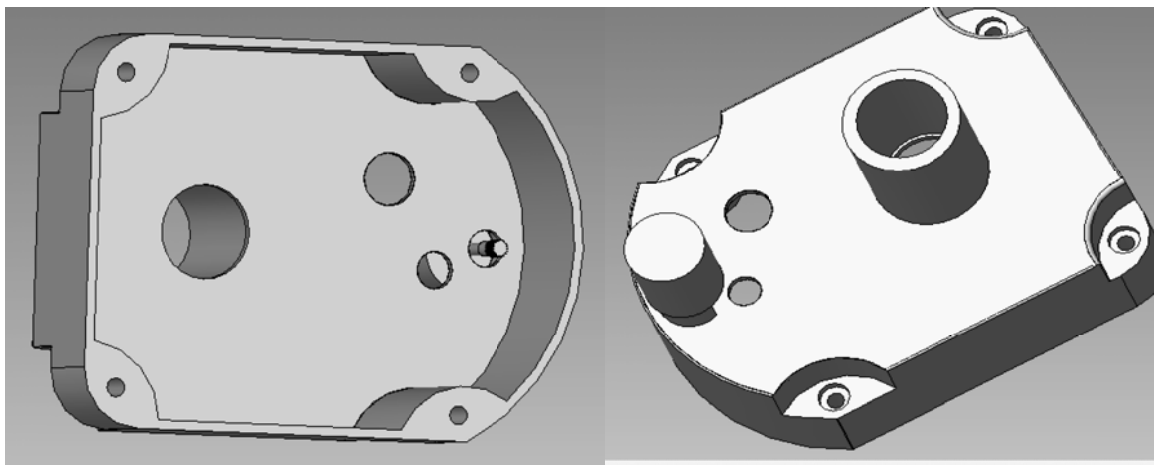
3.1.2 箱体设计

1. 箱体材料

由于箱体在底部需以地面固定, 为增大其稳定性, 并考虑到经济效益决定采用灰铸铁, 根据有关手册查得壁厚 $\delta=8\text{mm}$ 。

2. 箱体结构

底部箱体的结构采用如图 3-3 方案, 它可使底部的结构尽量紧凑。



3-3 箱体底部图

3.2 大臂及小臂设计

3.2.1 大臂驱动部分的设计

大臂长为 $L=600\text{mm}$

驱动大臂的总负载在一般情况下约为 50kg 。

旋转力矩 T 为： $T=120\text{N}$

$$P_0 = \frac{T \times n}{9550\eta} = 0.2\text{kW} \quad (n=15 \text{ r/min})$$

$$P_a = \frac{T \times n}{9550\eta_{\text{总}}} = 0.21\text{kW}$$

$$\therefore P_m \geq (1 \sim 2)(P_0 + P_a) = (1 \sim 2) \times 0.41\text{kW}$$

因此，经考虑可以选用型号为 130SZ04（小惯量）的电动机。

具体规格如下所示：

额定功率： 0.6kW

额定转矩： $1.9\text{N}\cdot\text{m}$

额定转速： 3000r/min

重 量： 11.8kg

大臂驱动部件采用 3 级半开式圆锥—圆柱齿轮传动路线见图 3-4。

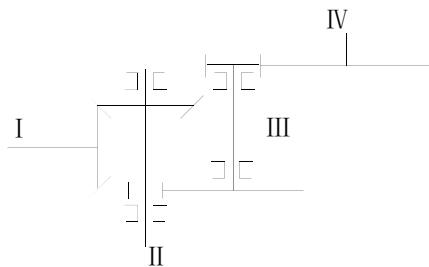


图 3-4 大臂传动简图

各轴转速、输入功率、转矩见表 3-3。

表 3-3 大臂各轴情况表

	轴 I	轴 II	轴 III	轴 IV
转速 (r/min)	3000	750	125	30
功率(Kw)	0.594	0.547	0.505	0.464
转矩 N·m	1.89	6.97	38.5	147.1

1.第一级锥齿轮传动设计

(1) 选择材料

由于机器人大臂旋转部分要求结构较小，质量较轻，同时又要有足够的刚度，因此要选用一些合金材料。在此，选用材料为：

小锥齿轮：20Cr2Ni4 渗碳淬火，硬度 HB=350,7 级精度；

大锥齿轮：20CrMnTi 渗碳淬火，硬度 HB=300,7 级精度 [5]。

HRC=58~62 取 HRC=60

(2) 设计计算

按齿面接触疲劳强度进行计算

寿命系数 Z_n 因长期使用，取 $Z_{n1}=Z_{n2}=1$

接触疲劳强度极限 σ_h

$$\sigma_{h1}=1380\text{MPa}$$

$$\sigma_{h2}=1380\text{MPa}$$

接触系数 $n_H=1.2$ ；设周速度 $V<3\text{m/s}$ ；则速度系数 $Z_V=1$

许用接触应力 $[\sigma_H]$

$$[\sigma_H]_1 = \frac{\sigma_{OH1} \cdot Z_n \cdot Z_R \cdot Z_V}{n_{H1}} = 1092.5\text{MPa}$$

$$[\sigma_H]_2 = \frac{\sigma_{OH2} \cdot Z_n \cdot Z_R \cdot Z_V}{n_{H2}} = 1092.5\text{MPa}$$

载荷系数

工作情况系数 $K_A=1.25$ ；动载荷系数 $K_V=1.35$ ；载荷分配系数

$$K_\beta=1.31$$

则载荷系数 $K=K_A K_V K_\beta =2.21$

$$\text{则 } \psi_{dm} = \psi_r \sqrt{\frac{u^2 + 1}{2 - \psi_r}}。$$

材料系数 $Z_E=189.8$

节点系数 $Z_H=2.37$

小齿轮转矩 T

$$T=9.55 \times 10^6 P_1 / n_1 = 1890.9 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

传动比 $i=4$

计算小齿轮直径

$$d_1 \geq \sqrt[3]{\left(\frac{Z_E Z_H}{[\sigma_H]}\right) \bullet \frac{4KT_1}{\psi_r (1 - 0.5\psi_r)^2 u}} = 15.47 \text{ mm}$$

验算圆周速度 V

$$\text{平均直径 } d_{m1} = (1 - 0.5\psi_r) d_1 = 13.54 \text{ mm}$$

则 $V=1.44 \text{ m/s}$ 与假定值相符合。

其几何尺寸见表 3-4。

表 3-4 大臂一级齿轮参数表

	Z_1	Z_2
齿数	19	76
节锥角 (°)	14.04	75.96
分度圆直径 (mm)	19	76
齿顶圆直径 (mm)	21	78
节锥顶距 (mm)	39.2	
模数	1	
齿宽	10	

按齿根疲劳强度进行校核

寿命系数 Y_n 因长期使用，取 $Y_{n1}=Y_{n2}=1$

$$\sigma_{OF2}=750 \text{ MPa}$$

弯曲安全系数 $S=2$

尺寸系数 $Y_{x1}=Y_{x2}=1$

许用弯曲应力 $[\sigma_F]$

$$[\sigma_{F1}] = \sigma_{OF1} \cdot Y_n \cdot Y_{x1} / n_F = 375 \text{ MPa}$$

$$[\sigma_{F2}] = \sigma_{OF2} \cdot Y_n \cdot Y_{x2} / n_F = 375 \text{ MPa}$$

齿根应力集中系数弯曲疲劳强度极限 $\sigma_{OF1} = 750 \text{ MPa}$

当量齿数: $Z_{e1} = Z_1 / \cos \delta_1 = 15.5$ $Z_{e2} = Z_2 / \cos \delta_2 = 247.3$

齿形系数: $Y_{F1} = 3.1$ $Y_{F2} = 2.28$

力集中系数: $Y_{s1} = 1.5$ $Y_{s2} = 1.74$

载荷系数 $K = K_A K_V K_\beta = 2.21$

弯曲应力 σ_F

$$\sigma_{F1} = \frac{4KT_1}{\psi_r (1 - 0.5\psi_r)^2 Z_1^2 m^3 \sqrt{u^2 + 1}} Y_{F1} Y_{s1}$$

$$= 324.3 \text{ MPa} < [\sigma_{F1}]$$

$$\sigma_{F2} = \frac{4KT_2}{\psi_r (1 - 0.5\psi_r)^2 Z_1^2 m^3 \sqrt{u^2 + 1}} Y_{F2} Y_{s2}$$

$$= 17.29 \text{ MPa} < [\sigma_{F2}]$$

结论: 弯曲强度是足够的。

2. 第二级圆柱齿轮传动设计

由于机器人大臂旋转部分要求结构较小, 质量较轻, 同时又要有足够的刚度, 因此要选用一些合金材料。小齿轮材料为 40Cr, 调质处理, 硬度为 HBS280, 大齿轮材料为 45 钢, 硬度为 HBS240, 二者材料硬度相差 HBS40。

选小齿轮的齿数 $Z_1 = 20$ 大齿轮的齿数 $Z_2 = 20 \times 6 = 120$

(1) 设计计算

按齿面接触疲劳强度设计, 计算公式为(3-1)

确定公式内的各计算值

试选载荷系数 $K_t = 1.4$

齿宽系数 $\phi_d = 0.6$

弹性系数 $Z_E=189.8\text{MPa}$

小齿轮接触疲劳强度极限 $\sigma_{Hlim1}=600\text{ MPa}$

大齿轮接触疲劳强度极限 $\sigma_{Hlim2}=550\text{ MPa}$

计算循环应力次数

$$N_1=60n_1jL_h=60\times 750\times 1\times 8\times 300\times 15=1.62\times 10^9$$

$$N_2=60n_2jL_h=60\times 125\times 1\times 8\times 300\times 15=1.7\times 10^8$$

取接触疲劳寿命系数 $K_{HN1}=0.90$ $K_{HN2}=0.95$

失效概率为 1%，安全系数 $S=1.2$

$$[\sigma_H]_1=K_{HN}\sigma_{Hlim1}/S=0.9\times 600=540\text{ MPa}$$

$$[\sigma_H]_2=K_{HN}\sigma_{Hlim2}/S=0.9\times 600=540\text{ MPa}$$

计算工作载荷

$$T_1=9.55\times 10^6\times P_2/n_2=5470\text{N}\cdot\text{mm}$$

初步求小齿轮直径

将上述各值代入公式(3-1)有

$$d_1\geq\sqrt[3]{\frac{2KT_1}{\phi_d}\cdot\frac{u\pm 1}{u}\cdot\left(\frac{Z_H\times Z_E}{[\sigma_H]}\right)^2}=19.05\text{mm}$$

$$\text{验算圆周速度: } \frac{\pi d_1 n_1}{60\times 1000}=1.31\text{m/s}$$

计算齿宽

$$b=\sigma_d\cdot d_{1t}=0.6\times 19=11.4\text{mm}$$

求载荷系数:

$$K=K_A K_V K_\alpha K_\beta$$

使用系数 $K_A=1.25$;

动载系数 $K_V=1.1$ (假定 $V=3\sim 8\text{m/s}$) ;

齿间载荷分配系数 $K_\alpha=1.2$;

齿向载荷分配系数 $K_\beta=1.4$;

将上述各值代入得 $K=1.25\times 1.1\times 1.2\times 1.4=2.31$ 。

按实际载荷系数校核多的分度圆直径

$$d_1=\sqrt[3]{\frac{K}{K_t}}d_{1t}=(2.31\times 19.32\div 1.4)^{1/3}=18.32\text{mm}$$

计算模数 $m=d_1/Z_1=18.32\div 17=0.916$

取 $m=1.25$ 。

其具体几何尺寸参数如表 3-5。

表 3-5 大臂二级齿轮参数表

	Z_1	Z_2
齿数	20	120
模数	1.25	
压力角 ($^\circ$)	20	
分度圆直径 (mm)	25	150
齿顶圆直径 (mm)	27.5	152.25
齿根圆直径 (mm)	21.875	146.875
中心距 (mm)	87.5	
齿宽 (mm)	15	10

3.第三级圆柱齿轮传动设计

材料同前，具体的设计参考前面的设计（计算略），其尺寸参数见表 3-6。

表 3-6 大臂三级齿参数表

	Z_1	Z_2
齿数	27	113
模数	1.5	
压力角 ($^\circ$)	20	
分度圆直径 (mm)	40	169.5
齿顶圆直径 (mm)	43.5	172.25
齿根圆直径 (mm)	36.75	165.75
中心距 (mm)	105	
齿宽 (mm)	15	10

4.驱动部分各传动轴的设计

(1) 第一级齿轮轴的设计

为使大臂的质量减轻，而又有一定的刚度、强度，因此该轴选 20Cr2ni4 调质处理。 $\sigma_B=850\text{MPa}$ ； $\sigma_S=670\text{MPa}$ ； $\sigma_{-1}=630\text{MPa}$ ； $\tau_{-1}=320\text{MPa}$ 。

受力分析

轴上锥齿轮直径 $d_1=19\text{mm}$

轴的传递功率 $P_1=0.594\text{kW}$

轴的转速 $n_1=3000\text{r/min}$

轴的转距 $T_1=1890\text{N}\cdot\text{mm}$

锥齿轮圆周力 $F_t=2T/d=199\text{N}$

锥齿轮径向力 $F_{r1} = F_t \tan \alpha \cos \delta_1 = 70.3\text{N}$

锥齿轮轴向力 $F_{a1} = F_t \tan \alpha \sin \delta_1 = 17.6\text{N}$

轴的最小直径计算公式如下

$$d_1 \geq A_3 \sqrt[3]{\frac{P_1}{n_1}} \quad (3-3)$$

将以上各值代入公式(3-3)得

$$d_1 \geq 107 \sqrt[3]{\frac{0.594}{3000}} = 6.75\text{mm} \quad (\text{考虑到有键槽削弱, 取 } d_1=10\text{mm})$$

结构设计如下图 3-5 所示

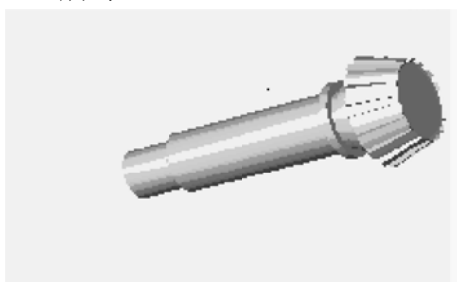


图 3-5 第一级齿轮轴

(2) 第二级齿轮轴的设计

具体步骤同前, 这里不在重复, 由公式(3-3)得

$$d_2 \geq A_3 \sqrt[3]{\frac{P_2}{n_2}} = 9.82\text{mm}$$

考虑到键槽的影响, 取轴的最小直径 $d=15\text{mm}$ 拟出的结构图如下图

3-6 所示。

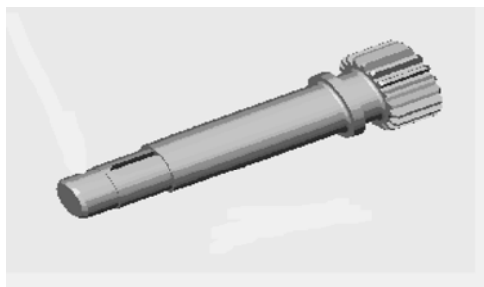


图 3-6 第二级齿轮轴

(3) 第三级齿轮轴的设计

具体步骤同前，这里不在重复，由公式

$$d_3 \geq A_3 \sqrt[3]{\frac{P_3}{n_3}} = 17.63 \text{mm}$$

考虑到键槽的影响，取轴的最小直径 $d=20\text{mm}$ 拟出的结构图如图 3-7 所示。

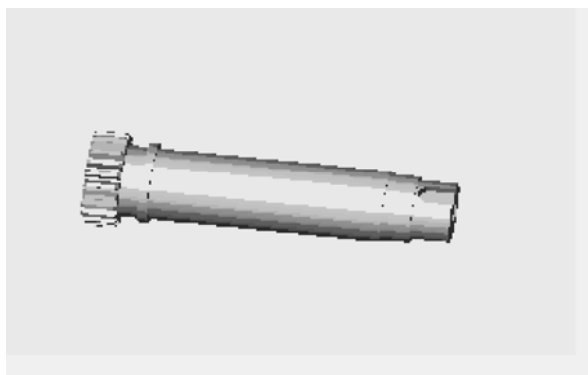


图 3-7 第三级齿轮轴

(4) 轴 IV 的设计

这里采用空心轴的形式，目的是为了减轻回转轴的质量和转动惯量。

由式：
$$d \geq A_3 \sqrt[3]{\frac{P_4}{n_4(1-\gamma^4)}}$$

取 $\gamma=0.8$; $A=107$; $P_4=0.464$; $n=30$

将各值代入上式的 $d \geq 32.13\text{mm}$; 取 $d=40\text{mm}$

具体外形如下图 3-8 所示：



图 3-8 轴 IV 外形图

3.2.2 小臂驱动部分的设计

臂长为 $L=650\text{mm}$ ，驱动小臂的总负载（初步估算）约为 25kg 。

旋转力矩 T 为： $T=100\text{N}$

$$P_0 = \frac{T \times n}{9550\eta} = 0.141\text{kW} \quad (n=15\text{r/min})$$

$$P_a = \frac{T \times n}{9550\eta_{\text{总}}} = 0.154\text{kW}$$

$$P_m \geq (1 \sim 2)(P_0 + P_a) = (1 \sim 2) \times 0.212\text{kW} \quad \text{取 } P_m = 0.4\text{ kW}$$

因此，经考虑后决定采用松下伺服电机，规格如下

额定功率为	0.4 kW
额定转速为	1500r/min
额定转距	1.3 N·m
重量	2.5kg

小臂驱动部件采用 3 级半开式圆锥—圆柱齿轮传动，其结构简图

见 3-9。

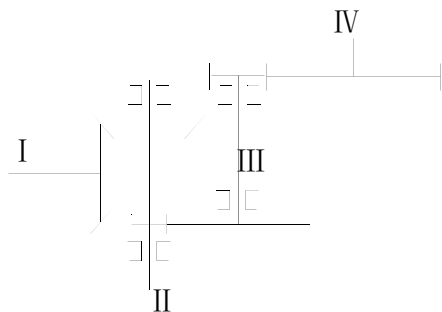


图 3-9 小臂传动简图

各轴转速、输入功率、转矩见表 3-7。

表 3-7 小臂各轴情况表

	轴 I	轴 II	轴 III	轴 IV
转速（r/min）	1500	375	62.5	15
功率(Kw)	0.396	0.380	0.365	0.350
转矩 N·m	2.521	9.677	55.772	222.833

1.圆锥—圆柱齿轮传动

其具体尺寸参数见表 3-8。

表 3-8 小臂一级齿轮参数表

	Z_1	Z_2
齿数	17	68
节锥角（°）	14.04	75.96
分度圆直径（mm）	22.5	90
齿顶圆直径（mm）	26.7	112.8
节锥顶距（mm）	46.4	
模数	1.5	
齿宽	11.6	

2. 第二级圆柱齿轮参数

表 3-9 小臂二级齿轮参数表

	Z_1	Z_2
齿数	25	150
模数	1	
压力角 ($^{\circ}$)	20	
分度圆直径 (mm)	25	150
齿顶圆直径 (mm)	27	152
齿根圆直径 (mm)	25.5	149.5
中心距 (mm)	87.5	
齿宽 (mm)	10	6

3. 第三级圆柱齿轮参数

表 3-10 小臂三级齿轮参数表

	Z_1	Z_2
齿数	40	167
模数	1	
压力角 ($^{\circ}$)	20	
分度圆直径 (mm)	40	167
齿顶圆直径 (mm)	42	169
齿根圆直径 (mm)	37.5	164.5
中心距 (mm)	103.5	
齿宽 (mm)	10	6

3.2.3 选择减速器

因为前面设计中腕部到末端执行器的距离定为 100mm，所以算出腕部的旋转扭距 $T_1=GL=6N\cdot m$ ，摆动转矩 $T_2=G_l=6N\cdot m$

$$\text{则 } P_1 = \frac{T_1 n_1}{9550 \eta_1}$$

式中 $n_1=20\text{r/min}$

$$\eta_1=0.8 \times 0.99=0.792$$

将各值代入得

$$P_1 = \frac{T_1 n_1}{9550 \eta_1} = 0.016 \text{ kW}$$

$$P_a = \frac{T \times n}{9550 \eta} = 0.005 \text{ kW}$$

则 $P_m \geq P_1 + P_a \geq (1 \sim 2) \times 0.016$ 取 $P_m=0.03 \text{ kW}$

采用 MANA 系列（小惯量）直流伺服电机，尺寸规格如下：

额定功率：0.03kW	额定转矩：0.095N·m
最大转矩：0.28 N·m	惯量：0.20×10 ⁻⁴
额定转速：3000r/min	最高转速：5000r/min
质量：0.53kg	

在此处由于传动系统的减速比太高（ $i=150$ ），因此决定采用谐波传动的方式。谐波传动的基本构件是波发生器、刚轮和柔轮。当波发生器转动时，迫使柔轮产生连续移动着的弹性变形波，并与刚轮相互作用而实现传动。而且谐波传动与一般齿轮传动相比，有许多特点：传动平稳，承载能力高。在传动时同时参与啮合的齿数多，故传动平稳，承载能力高，传递单位扭矩的体积和重量小。在相同的工作条件下，体积可减小 20%—50% 传动比大，而且范围广、零件少、体积小、重量轻、运动精度高而回差小、运动平稳噪声低、承载能力高、磨损小、效率高，可通过密封壁传递运动。无论作为控制系统的传动或大转距的动力传动都能得到满意的结果。

经过各种传动比优化和计算后，决定采用的谐波减速器型号为 XB—32—100B

减速比	$i = 100$
输入	$n \leq 3000 \text{ r/min}$

输出力矩 $T=6\text{N}\cdot\text{m}$

质量 $m=0.5\text{kg}$

电机经谐波减速后的功率 $P=P_0\bullet\eta=0.024\text{kW}$ 因减速器传动比 $i=100$ 则输出转速 $n=30\text{r/min}$

经计算后得出的锥齿轮尺寸如表 3-11 所示。

表 3-11 小臂一级锥齿轮参数

	Z_1	Z_2
齿数	17	17
节锥角 ($^\circ$)	45	45
分度圆直径 (mm)	34	34
齿顶圆直径 (mm)	36.83	36.83
节锥顶距 (mm)	24.04	
模数	2	
齿宽	14	

3.2.4 同步带的设计计算

小臂的设计的形式一般为多层套筒组合而成,通过内外套筒的相对转动来带动腕部的三个自由度转动。但这种结构最大的缺点是制造非常复杂,成本高。因此,借鉴人家的设计方法用了一种同步带传动的方式,因为同步带传动综合了带传动和链传动的优点。同步带工作时,带的凸齿与带轮外缘上的齿槽进行啮合传动。由于抗拉层承载后变形小,能保持同步带的周节不变,故带与带轮间没有相对滑动,从而保证了同步传动。同步带的优点是: a) 无滑动,能保证固定的传动比; b) 预紧力较小,轴和轴承上所受的载荷小; c) 带的厚度小,单位长度的质量小,故允许的线速度较高; d) 带的柔性好,故所有带的直径可以较小。

具体数据为: 输入功率 $P_\lambda=0.25\text{kW}$, 转速 $n_1=30\text{r/min}$, 传动比

$i=1.5$, 轴间距 480mm , $T_{\text{每天}}=8\text{h}$ 。

表查得

$$k_a = 0.25$$

$$P_d = k_A p = 0.96 \text{ kW}$$

根据和 $n_1 = 30 \text{ r/min}$ 查得应选用 XL 型，节距 $p_b = 5.08 \text{ mm}$

小带轮齿数根据带型 H 和小带轮转速

查得小带轮齿数 $Z_{1\min} = 12$ ，在此取 $Z_1 = 14$

小带轮节圆直径

$$d_1 = \frac{Z_1 p_d}{\pi} = 42.45 \text{ mm}$$

查得其外径 $d_{a1} = 41.69 \text{ mm}$

大带轮齿数： $Z_2 = iZ_1 = 1.5 \times 14 = 21$

大带轮节圆直径： $d_2 = \frac{Z_2 p_d}{\pi} = 63.67 \text{ mm}$

查得其外径 $d_{a2} = 62.91$

$$\text{带速 } V = \frac{\pi d_1 n_1}{60 \times 1000} = 0.0356 \text{ mm}$$

初定轴间距：取 $a_0 = 480 \text{ mm}$ m/s

$$\text{带长： } L_0 = 2a_0 + \frac{\pi}{2}(d_1 + d_2) + \frac{(d_2 - d_1)^2}{4a_0} = 1126.9 \text{ mm}$$

$$\text{小带轮啮合齿数 } Z_m = \text{ent} \left[\frac{Z_1}{2} - \frac{p_b Z_1}{2\pi^2 a} (Z_2 - Z_1) \right] = 6$$

$$\text{基本额定功率 } P_0 = \frac{(T_a - mV^2)V}{1000} = 0.0164 \text{ kW}$$

查得 $T_a = 50\text{N}$; $m = 0.022$ 所需带宽 $b_s = b_{s0} \sqrt[1.14]{\frac{P_d}{K_Z P_0}}$

查得 XL 型带 $b_{s0} = 9.5\text{mm}$; $Z_m = 6$ $K_Z = 1$

则 $b_s = 8.7\text{mm}$

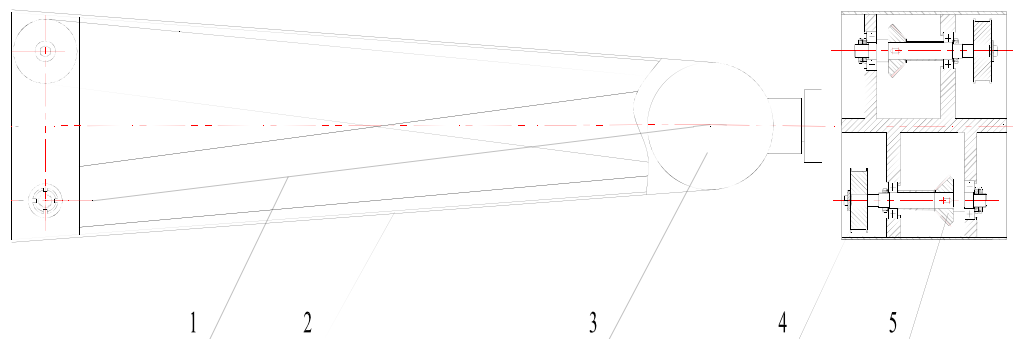
根据查得应选用带宽代号为 036 的 XL 型带，其 $b_s = 9.5\text{mm}$

带轮结构和尺寸如下

小带轮 $Z_1 = 14$ $d_1 = 42.45\text{mm}$ $d_{a1} = 41.69\text{mm}$

大带轮 $Z_2 = 21$ $d_2 = 63.67\text{mm}$ $d_{a2} = 62.91\text{mm}$ [12]

安装方式如图 3-11 所示



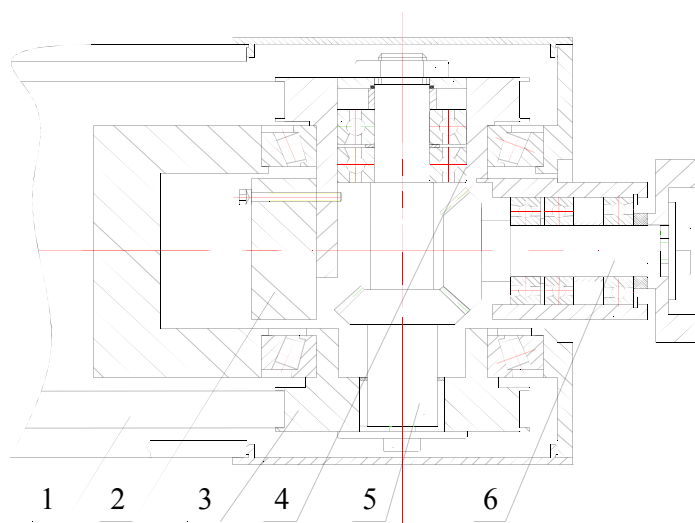
1-皮带；2-小臂；3-手腕；4-同步带轮；5-锥齿轮

图 3-11 小臂结构简图

3.3 腕部设计

喷漆机器人的腕部位于小臂臂体的前端，腕部的摆动回转运动由安装在小臂臂体后端的伺服电机经同步传动带传动，通过设置在腕部的谐波减速器带动腕部转动。手腕的功能是利用自身的活动度确定被末端执行器夹持物体的空间姿态，也可以说是确定末端执行器的姿态。它的结构设计要求是：重量轻；传动系统结构简单并有利于小臂对整机的静力平衡。

本次设计的腕部结构采用两自由度的汇交式结构，其具体的结构见图 3-12



1-同步带；2-机架；3、4-同步带轮；5-齿轮轴；6-齿轮轴

图 3-12 手腕结构图

图中同步带轮 1 由后置的驱动器带动，与锥齿轮轴 5 相连，通过齿轮副带动末杆回转；同步带轮 7 与机架 2 相连，也是由后置的驱动器带动，使末杆摆动，从而形成两个自由度。其中两个带轮对称的分配在小臂中线的两边，使得结构紧凑，驱动器的后置，对小臂的平衡十分有利。

第 4 章 工业机器人的控制系统

4.1 控制特点与分级

4.1.1 工业机器人的控制有如下特点

1. 机器人有若干个关节，典型工业机器人有 5 至 6 个关节。每个关节由一个伺服系统控制，多个关节的运动要求各个伺服系统协同工作。

2. 机器人的工作任务是要求操作机的末端执行器进行空间电位运动或轨迹运动。对机器人运动的控制，需要进行复杂的坐标变换运算，以及矩阵函数的逆运算。

3. 机器人的数学模型是一个多变量，非线性和变参数的复杂模型，各变量之间还存在着耦合，因此机器人的控制经常使用前馈、补偿、解耦、自适应等复杂控制技术。

4. 较高级的机器人要求对环境条件，控制指令进行测定和分析，采用计算机建立庞大的信息库，用人工智能的方法进行控制、决策、管理和操作，按照给定的要求，自动选择最佳控制规律。

另外机器人的控制系统相当于人的大脑，它指挥着机器人的动作，并协调机器人与生产系统之间的关系。机器人的工作顺序，应达到的位置、动作时间间隔、运动速度等都是在控制系统指挥下，通过每一运动部件沿各坐标轴的动作来实现的。

值得注意的是，一般机械设备的控制系统，多着眼于自身运动的控制，而工业机器人的控制系统则更注重本体与操作对象的关系。因为，无论多么高级的控制系统，如果不能按要求把工件传送到指定的位置，都是毫无意义的。

工业机器人的控制对象特性往往变化大，且有外界负荷干扰。因此，要求控制系统精度高，稳定性好，保证工作可靠，并能满足生产系统节拍的要求。

机器人的控制部分，严格地讲，不仅是指发出动作指令信号的控制

制单元，还应包括伺服机构、反馈环节的检测元件等，才能共同构成一个完整的控制系统。一般的喷漆机器人控制装置由计算机控制系统、四闭环（电流、速度、位置、加速度）位置数字伺服系统、功率驱动系统、示教盒、操作键盘、显示系统、电源、冷却系统等部分组成。下图为喷漆机器人控制装置硬件系统图见图 4-1。

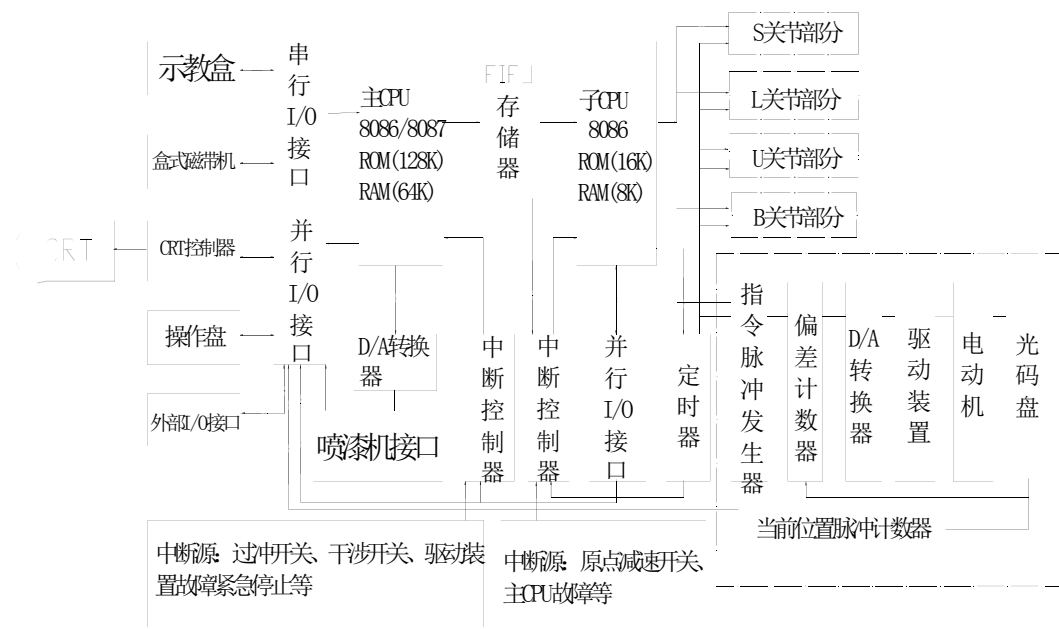


图 4-1 控制装置硬件系统图

4.1.2 机器人控制系统分级

按照国外的一般表示方法，机器人控制系统是一种分级结构系统，它包括以下三级：

1.作业控制器 根据示教操作，记忆每步动作的顺序，程序步进的条件、每步程序的内容(位置、速度、轨迹等)，依次发出相应的作业指示。同时，随着作业的进行，对生产系统来的外部信号进行处理。

2.运动控制器 用于进行连续轨迹控制(CP),接受作业控制器来的程序指令,对应所要求的运动轨迹,产生给定值(将程序步的作业指令变换为各运动轴的动作指令),送给驱动控制器,控制各轴运动。在点位控制(PTP)中,没有这部分,而由作业控制器将给定值直接送给驱动系统。

3.驱动控制器 在伺服机构的控制回路中,每一部件的每个运动坐标轴有一个驱动控制器控制。

在采用微型计算机控制的工业机器人中,微型机可以承担上述作业控制和运动控制功能,包括程序示教、程序编辑、轨迹插补运算以及坐标变换等,而由伺服驱动控制器承担的位置、速度控制及各种补偿、修正等,可以通过微型机总线上所带的伺服接口来实现。许多运动控制功能和伺服功能是通过软件加以实现的。根据机器人控制功能的多少及控制的复杂程度,可以相应的采用单台微型机,或者将功能分散化,在一台主机协调下由多台微机组成分布处理系统

4.2 运动控制方式

4.2.1 点位控制方式

工业机器人的控制方式可分为点位控制和连续轨迹控制两种,这两种控制方式的区别如下图 4-2 所示(a. PTP 方式; b. CP 方式)。

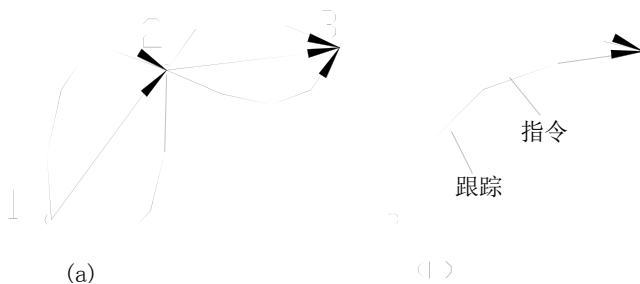


图 4-2 控制方式简图

这种控制方式就是由点到点的控制方式，只控制机器人运动部件（手、腕、臂）所应到达的空间点的定位，而对两个定位点之间的运动轨迹则不加控制。在点位控制中，只注意工业机器人在工作程序中应到达的各定位点，至于它是怎样到达这些点，即中间经过什么路径达到各点，则是无关紧要的。这种方式可以达到较高的重复定位精度（ $\pm 0.05\text{mm}$ ）。

点位控制又分为两点控制和多点控制两种。如果机器人抓取和放置工件的位置都是准确而固定的，如冷加工自动线上传递工件的专用机械手，是由挡块，行程开关等来定位的。则可以采用起点和终点的“两点控制方式”。而与次不同，如自动仓库中传输物料的工业机器人，则要求多点定位，而且要经常更换设定位置。这时一般装有位置检测器，作为运动位置的反馈，即采用“多点控制方式”。

定位点为二点的点为控制，采用开关型“（ON-OFF）”控制机构就可以实现，多点定位控制，一般要采用带反馈环节（行程检测元件）的闭环伺服控制机构，或者数控开环机构。

4.2.2 连续轨迹控制方式

不仅要控制行程中所有中间点的位置和终点位置，而且，还应同时对运动轴同时进行连续控制。这种控制方式的中间定位点是无限多的。如焊接、喷漆等工业机器人，需要采用连续轨迹控制方式，在控制其运动轨迹的同时，还需要控制其运动速度与加减速。

连续轨迹控制，一般要采用闭环伺服机构（也有少数采用数控开环伺服机构）。位置信息的给定方式有两种：

1. 示教方式

通过操作杆或示教盒，将连续轨迹上各点坐标值输到存储单元（同时也可以输入机器人通过各点的运动速度等条件）。

2. 数值控制方式

将机器人动作端的运动数值化，根据数值指令进行动作。可以给出机器人运动轨迹的数字式，利用数控插补运算功能，进行直线、圆弧、抛物线、椭圆等函数插补运算，控制机器人运动轨迹。

事实上，在连续轨迹控制中，也不一定都是一点不差的跟踪控制。例如，在示教时，每隔一定时间间隔或距离，记录一点的坐标值。当再现时，把这些点群按直线或圆弧连接起来形成轨迹。这种方式对于降低工业机器人的控制器，特别是存储器的成本是有益的。

此次机器人可以运用双摄像机跟踪控制。

目前，在激光加工等许多应用领域中对工业机器人的精度特别是连续运动轨迹精度提出了较高的要求。因此研究和建立能够方便地检测工业机器人运动轨迹准确度的方法具有重要意义。目前常用的机器人检测技术分为接触式和非接触式两类，接触式测量方法测量速度慢，测量范围有限，不能满足运动轨迹准确度 CP(Continuous path)性能检测的要求。非接触式测量方法分为主动感觉系统和被动视频系统两种。主动感觉系统向被测物体发送如红外线、激光和超声波等信号，通过检测返回的信号来获取机器人的位置信息。此方法结构复杂、操作难度大、计算过程繁琐和成本昂贵。基于多目视觉的被动视频系统受到广泛关注,但现有的多目视觉系统在进行三维空间大范围、连续运动测量时，还有待于在系统结构、性能和价格等方面进一步完善。

以立体视觉理论为基础，研究了基于空间直线的二维投影面方程。根据投影面的空间解析几何约束关系，建立基于直线特征匹配的双目视觉误差测量的数学模型。在该模型基础上采用将两台摄像机固定于工业机器人末端的方案，对关节型工业机器人运动轨迹的准确度进行了检测。结果表明，该检测方法简单实用，基本上可以满足工业机器人 CP 性能检测的要求。

三维空间内的一个点可以用世界坐标系(x_w, y_w, z_w)表示。它发出的光经过摄像机采集并以标准视频信号的形式输入计算机，再由图像采集卡将其转换为数字图像，即一个二维数组，组元(即是图像中的一个像素)的数值为图像的亮度。以像素为单位定义直角坐标系，像素的坐标(u, v)分别对应该像素在二维数组中行和列。定义摄像机坐标系(x_c, y_c, z_c)以摄像机光心 O_c 为原点，光轴为 z_c ， x_c 轴和 y_c 轴分别与上述坐标系的 u, v 轴对应。

根据双目视觉理论和空间解析几何的相关内容建立了工业机器人运动轨迹位姿检测的数学模型。应用该模型对一种关节型工业机

机器人的轨迹进行测量。结果表明，根据该模型建立的检测系统能够简单方便地测量工业机器人的运动轨迹位置准确度和轨迹姿态准确度，测量结果可靠，具有一定的应用前景。该方法也为机器人运动过程位姿的控制提供了基础^[5]。

4.3 控制装置的软件系统

4.3.1 喷漆机器人软件系统

喷漆机器人控制系统的软件包括以实时操作控制为核心的模块结构、机器人语言、自动编程软件、空间轨迹规划极其实时算法软件、自动诊断软件、人一机对话软件等。

由于采用模块化的阶层构造，实现了软件系统的灵活性、扩展性。达到了下列目的：

基本软件 是通用系统软件，可适用于不同机种与作业。

显示 不同机种只改变画面结构与文字。

作业条件 引入变量参数，机种不同只需重新定义。

I/O 控制 I/O 控制分通用口与专用口，专用口在喷漆机器人控制上配喷漆接口板。

坐标变换与插补计算 备有通用标准函数计算库，同时可根据不同的机种配置不同的坐标变换与插补计算模块。

伺服控制 对同一执行机构，其模块是通用的。

传感器与上位管理机，还留出了用于扩展的接口，主要有：

机器人语言 机器人的语言命令是一种使用户非常容易理解的语言，语言中的每个语句命令都与某种功能相对应，喷漆机器人的各种动作都可以用这些语句的组合来完成。

人一机对话语言命令 人一机对话是采用“软键”与“定义键”组来完成操作者与机器人的对话。操作者只要指定机器人当时的工作性质，机器人就能按已定的工作性质顺序逐项地通过 CRT 与操作者对话，该部分语言序列以文字形式出现，起引导、提示作用，使操作者能快速编程和简单、直观地管理与监视机器人。

软件的数据结构 该软件数据结构采用分离构造、可变格式、引入变量常数及综合链、队等结构。

4.3.2 喷漆机器人喷漆系统

喷漆机器人喷机系统是喷漆机器人的关键配套设备，主要由三部分组成：喷漆电源、喷漆管路装置及接口箱。

喷漆电源由集成电子元件和可控硅元件控制，采用可控硅整流方式。它应用了瞬间控制技术、输出电流波形控制技术等，使该喷漆电源具有优良的启动性能和中电流区域（180—280A）扩散区域明显减小的特点，提高了喷漆的外观及喷漆的质量。喷漆电源调节范围为 60—300A，喷漆电压调节范围为 16—36V。

接口箱用于喷漆电源与喷漆机器人控制装置之间的信号传递和处理。一方面传递控制装置指令，使其自动调整喷漆参数（如喷漆电流、电压、喷漆速度）；另一方面监测喷漆过程、状态，使喷漆机器人控制装置实时监控喷漆状态，判断有无喷漆故障发生（如堵塞、无油漆等），保证喷漆机器人的顺利安全工作。

该喷漆机器人具有结构紧凑、体积小、占地面积小、动作灵活、速度快、工作范围大、重复位置精度高、操作调整方便、工作稳定可靠等一系列特点。

结论

本次设计的基本任务是完成喷漆机器人机械结构设计，在设计过程中我的主要工作就是选择适合的电机，设计腰部、大臂、小臂部分的传动方式，其中腰部采用三级直齿轮传动，其传动比为 200，腰部的 II 轴、III 轴均采用齿轮轴，四轴采用空心轴，并将齿轮交错布置以节省空间。大臂采用圆锥-圆柱齿轮传动，传动比为 200，小臂采用圆锥-圆柱齿轮传动，传动比为 150。小臂部分减速比较大，但外形尺寸较小，故选用 XB▼▼▼-32-100B 型谐波减速器。同时选用 H 型同步带。

本次设计的的机器人须有五个自由度以完成平面及一般曲面的喷漆作业，其中腰部电机通过三级减速后驱动腰部在水平面内转动，实现一个自由度。大臂上的伺服电机通过三级减速驱动大臂在竖直面内转动，实现一个自由度。小臂伺服电机通过三级减速驱动大臂在竖直面内转动，实现一个自由度。同时小臂伺服电机通过上下布置的同步带驱动手腕在素质面竖直面内，并使其在水平面内转动，从而实现其五个自由度，满足喷漆作业的要求。

致谢

本次设计是一个综合性的设计，却以前从未接触过，刚开始做的时候，我感到无从下手，感到学过的知识用不上，自己又没有专门的图纸、资料，对于机器人的认识也相当的浅薄，在这种情况下遇到的难题一个接着一个。通过这次设计，也充分的暴露出我的不足和缺陷，在没办法做下去时，老师给了我很多的参考资料，并帮我规划设计的总体步骤和方向，让我能够接着做下去。在我自己的努力和老师的指导下以及其他老师的帮助下，我终于完成了设计，设计一定有很多地方不够合理、完善，但是我努力了、并从中体验了失败和成功的苦与乐。在这里，我再次感谢姜伟老师对我的指导和帮助，同时对帮助过我的老师和同学表示感谢。不足之处，希望各位老师给我批评和指正。

参考文献

- 1 杜祥瑛.工业机器人及其应用[M].北京：机械工业出版社，1991：52-57
- 2 毛谦德.李振清 . 袖珍机械设计师手册[M].北京：机械工业出版社，1994：120-135
- 3 张伯鹏.机械制造及其自动化[M].北京：人民交通出版社，2003：12-14
- 4 机电一体化技术应用实例编委会编.机电一体化技术应用实例[M].北京：机械工业出版社，1995：46-61
- 5 赵松年.张奇鹏.机电一体化机械系统设计[M].北京：机械工业出版社，1994：5-9
- 6 联合编写组.机械设计手册上册[M].北京：化学工业出版社，1987：23-41
- 7 东北工学院机械设计教研室编.机械零件设计手册[M].北京：冶金工业出版社，1975：8-31
- 8 郭芝俊.左宝山.张桂芳.张宝兴.机械设计便览[M].天津：天津科学技术出版社，1986：15-17
- 9 濮良贵.纪名刚.机械设计（第七版）[M].北京：高等教育出版社，2001：79-83
- 10 陈秀宁 . 施高义 . 机械设计课程设计[J].浙江：浙江大学出版社，1995：15-21
- 11 王天然.机器人[J].北京：化工工业出版社，2002:2-9
- 12 徐灏.机械设计手册 4[M].北京：机械工业出版社，1991:256-261
- 13 张展 . 机械设计通用手册[M].北京：中国劳动出版社，1993:124-153
- 14 成大先.机械设计图册第5卷[J].北京：化学工业出版社，2000：320-322
- 15 马香峰等著.工业机器人的操作机设计[J].北京：冶金工业出版社

社, 1998 :25-27

17 龙立新.工业机械手的设计分析[J].上海: 上海交通大学出版社,1999.3:73-79

18 孙靖民.机械优化设计[M].北京: 机械工业出版社,2000:5-13

19 刘惟信.机械最优化设计(第二版)[M].北京:清华大学出版社,1997:150-162

20 Tarn. T.J., et.al., Effect of Motor Dynamics on Nonlinear Feedback Robot Arm Control, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol 7. No. 1, February 1991

21 Tarn. T.J. et.al, Performance Comparison of Four Manipulator Servo Schemes. IEEE Control Systems Journal, 1993