

# 直角坐标机器人结构设计

## 摘要

随着现代工业的不断发展，不但使传统工业的生产发生了根本性的变化，而且也对人类社会的生产产生了重大的影响。机器人作为现代工业生产的一种工具，不仅大大的提高了生产力，而且把人从各种生产环境中解放出来。目前，许多国家的工业机器人技术得到很好的发展，我国也在进行深入的研究和开发。本文主要是设计一个搬运工件的直角坐标机器人，它可以应用在自动化生产线上与人工相比具有速度快、定位精度准确的特点，具有很强的实用性能。作为直角坐标机器人结构设计，本文用了第二、三、四章详细阐述了设计过程，第五章简要介绍了机器人的控制部分，第六对机器人进行了效果分析，并总结了直角坐标机器人的特点。设计不拘泥于常规，使产品具有更广阔的发展空间，必将成为机器人的发展趋势。

**关键词:** 直线、直角坐标机器人、结构

# Cartesian Robot Design

## Abstract

With the continuous development of modern industry, not only the production of traditional industries has undergone a fundamental change, but also the production of human society has had a major impact. Robot as a tool of modern industrial production, not only greatly increase the productivity and the production environment from a variety of liberation. Currently, many countries have very good industrial robot technology development, China is also in-depth research and development. Porters of this paper is to design a piece of the Cartesian coordinate robot, which can be used in automated production lines and artificial compared to fast, accurate positioning accuracy characteristics, with strong practical performance. As the design of the right-angle coordinate robot, the text uses the second the third and the forth chapters to say the process of the design. The five chapter briefly describes some of the robot's control. The sixth chapters carried out effectiveness analysis and summarizes the characteristics of a Cartesian coordinate robot. The design makes the products have much more development, which must be the current of robot's development.

**Key words:** Straight line   Cartesian coordinate   Structure

# 目 录

摘要.....	I
Abstract.....	II
一 绪 论 .....	1
1.1 选题背景 .....	1
1.2 直角坐标机器人的应用及分类 .....	1
1.3 当前机器人技术的发展 .....	2
1.3.1 机器人发展的概况 .....	2
1.3.2 直角坐标机器人的发展情况 .....	4
1.4 选题的意义和目的及设计基本步骤 .....	5
1.5 本文研究的主要内容 .....	5
二 直角坐标机器人的工作原理 .....	7
2.1 实现三个自由度运动的基本原理 .....	7
2.2 末端执行器抓取工件的基本原理 .....	7
2.2.1 概述 .....	7
2.2.2 手指式手部的工作原理 .....	8
三 直角坐标机器人结构设计 .....	10
3.1 直角坐标机器人外形方案的确定 .....	10
3.2.1 直角坐标机器人传动方式的选择 .....	10
3.2.2 直角坐标机器人驱动方式的选择 .....	11
3.3 直角坐标机器人外形尺寸的确定 .....	11
3.4 传动部件、驱动部件类型及主要参数的选择 .....	12
3.4.1 传动部件参数的选择 .....	12
3.4.2 驱动部件的选择 .....	19
3.5 其它辅助部件的设计 .....	22
3.5.1 直线导轨的选择 .....	22
3.5.2 滚动轴承的选择 .....	23
3.5.3 机器人拖链的选择 .....	24
3.5.4 其它部件的设计 .....	24
3.6 机械手结构设计 .....	24
3.6.1 机械手的结构特点 .....	24
3.6.2 机械手的手部尺寸及抓取范围 .....	25
3.6.3 机械手传动装置的设计 .....	25
3.6.4 机械手驱动装置的选择 .....	26
3.6.5 机械手其它部件的选择 .....	26
四 机器人的校核及结构的可靠性分析 .....	27

4.1 轴承的校核 .....	27
4.2 各主要功能部件的可靠性分析 .....	27
4.3 各自由度间连接件的可靠性分析 .....	28
4.4 轴的校核计算 .....	29
<b>五 机器人的控制 .....</b>	<b>31</b>
5.1 步进电机的概况 .....	31
5.2 步进电机的工作原理 .....	31
5.3 步进电机的控制 .....	32
5.5 直角坐标机器人的控制方式 .....	33
5.3.1 步进电机专用控制芯片的概述与特性 .....	33
5.3.2 专用芯片的选择及电路设计 .....	34
<b>六 直角坐标机器人的效果分析及技术评价 .....</b>	<b>37</b>
6.1 直角坐标机器人的效果分析 .....	37
6.1.1 直角坐标机器人与人工操作的比较 .....	37
6.1.2 采用机器人工作带来的问题 .....	37
6.2 直角坐标机器人结构的技术评价 .....	37
6.2.1 整体结构技术评价 .....	37
6.2.2 零件的技术分析 .....	38
<b>结束语 .....</b>	<b>39</b>
<b>致谢 .....</b>	<b>40</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>41</b>

## 一 绪 论

### 1.1 选题背景

工业自动化的历史是以技术手段的快速更新为特征的。这种自动化技术的更新不论是看作世界经济发展的诱因还是结果，都和世界经济密切相关。工业机器人在 20 世纪 60 年代毫无疑问是一种独特的设备，将其和计算机辅助设计（CAD）系统、计算机辅助制造（CAM）系统结合在一起应用，这是现代制造业自动化的最新发展趋势。这些技术起码在引导工业自动化向一个新的领域过渡[1]。

机器人的使用量增长的主要原因是价格不断降低。在 20 世纪 90 年代的十年间，机器人价格降低而劳动力成本增加。机器人不仅越来越便宜，而且它们在工业领域变得更加有效——速度更快、操作更准确、更富有柔性。如果在成本统计中将质量因素考虑在内，应用机器人的成本将比它的实际下降快得多。由于机器人作业变得愈加有效，而劳动力成本不断升高，因此工业中越来越多的作业更适合于应用机器人自动化。这是工业推动机器人发展的主要因素。其次是非经济因素造成的，随着机器人作业能力的增强，它们可以完成更加危险或不可能完成的工作。

机器人的使用不仅提高了生产效率而且增强了工作范围。在许多领域中用到机器人搬运，如在汽车制造、食品包装、化学医药、电子器件等。而直角坐标机器人在码垛机和搬运机使用越来越多，其特点是负载范围大，小到几公斤，大到几吨；运行速度快，且速度可调整；动作灵活，可完成复杂的任务；可靠性高，维护简单。

### 1.2 直角坐标机器人的应用及分类

因末端操作工具的不同，直角坐标机器人可以非常方便的用作各种自动化设备，完成如焊接、搬运、上下料、包装、码垛、拆垛、检测、探伤、分类、装配、贴标、喷码、打码、（软仿型）喷涂、目标跟随、排爆等一系列工作。特别适用于多品种，便批量的柔性化作业，对于稳定，提高产品质量，提高劳动生产率，改善劳动条件和产品的快速更新换代起着十分重要的作用。

1、按用途分为：焊接机器人、码垛机器人、涂胶（点胶）机器人、检测（监测）

机器人、分拣机器人、装配机器人、排爆机器人、医疗机器人、特种机器人等。

2、按结构形式分为：壁挂（悬臂）机器人、龙门机器人、倒挂机器人等

3、按自由度分为：两坐标机器人、三坐标机器人、四坐标机器人、五坐标机器人、六坐标机器人。[2]

## 1.3 当前机器人技术的发展

### 1.3.1 机器人发展的概况

#### （1）世界机器人的发展情况

两院院士宋健曾说过：“机器人学的进步和应用是本世纪自动控制最有说服力的成就，是当代最高意义上的自动化”。科学的进步与技术的创新，为机器人的研究与应用开辟了广阔的思路与空间。

20 世纪 50 年代是机器人的萌芽期，其概念是“一个空间机构组成的机械臂，一个可重复编程动作的机器”。1954 年美国戴沃尔发表了“通用重复型机器人”的专利论文，首次提出“工业机器人”的概念；1958 年美国联合控制公司研制出第一台数控工业机器人原型；1959 年美国 UNIMATION 公司推出第一台工业机器人。

60 年代随着传感技术和工业自动化的发展，工业机器人进入成长期，机器人开始向实用化发展，并被用于焊接和喷涂作业中。

70 年代随着计算机和人工智能的发展，机器人进入实用化时代。日本虽起步较晚，但结合国情，面向中小企业，采取了一系列鼓励使用机器人的措施，其机器人拥有量很快超过了美国，一举成为“机器人王国”。

80 年代，机器人发展成为具有各种移动机构、通过传感器控制的机器人的运动。使机器人的运动与控制更加的准确稳定。

80 年代后期至今天机器人的技术日臻成熟，使得机器人有了更进一步的发展，产生了有力觉视觉的机器人并随着计算机技术的发展，产生了智能机器人，智能机器人的产生为机器人工业的发展提出了一个更新的发展方向，为今后机器人工业的发展指明了方向。

#### （2）国内工业机器人的发展情况

我国工业机器人起步于 20 世纪 40 年代初期，经过 30 多年的发展，大致可分为 3 个阶段：70 年代的萌芽，80 年代的开发期，90 年代的实用化期。在高技术发展的失去

下,随着改革开放方针的实施,我国机器人技术的发展得到政府的重视的支持。在 80 年代中期,国家组织了对工业机器人需求的行业调研,结果表明,对第一代工业机器人的需求主要集中在汽车行业(占总需求的 60%~70%)。在众多专家的建议和规划下,于“七五”期间,由机电部主持,中央各部委,中科院能及地方科研所的大学参加,国家投入相当资金进行了工业机器人基础技术、基础元器件、几类工业机器人整机及应用工程的开发研究。经过五年攻关,完成了示教再现式工业机器人成套技术(包括机械手、控制系统、驱动转动单元、测试系统的设计制造应用的小批量生产的工艺技术等)的开发,研制出喷漆、弧焊、点焊的搬运等作业机器人整机,几类专用和能耐通用控制系统及几类关键元部件的主要性能指标达到 80 年代初国外同类产品的水平,并且形成小批量生产能力。经过 80 年代的尤其是后 5 年的努力,我国的工业机器人技术的发展基本上可以立足于国内。90 年代中期,国家已选择以焊接机器人的工程应用为重点进行开发研究,从而迅速掌握焊接机器人的应用工程成套开发技术、关键设备制造、工程配套、现场运行等技术。目前已有 500 台左右的粘接机器人分布于大陆各大中城市的汽车、摩托车、工程机械等制造业,其中 55%左右为扳焊机器人,45%左右为点焊机器人,已建成的机器人焊接柔性生产线 5 条,机器人焊接工作站 300 个。90 年代后半期是实现国产机器人的商品化,为产业化奠定打基础的时期,目前我国(指大陆地区,不包括港、澳、台)工业机器人数量只有约 2500 台,还没达到 1997 年新加坡(3000 多台)的我国台湾省(5000 多台)的水平产。

### (3) 工业机器人的发展趋势

①机器人朝着标准化方向发展。若想提高运动速度的运动精度,减轻重量和减安装占用空间,必将导致工业机器人功能部件的标准化的模块化,以降低制造成本的提高可靠性。

②注意研究新型机器人结构。随着工业机器人作业精度的提高、作业环境的复杂化,应开发新型微动机构保证动作精度,开发多关节、多自由度的手臂和手指,研制新型的机构等以适应复杂作业的需要。

③机器人朝着智能化方向发展。在多品种,小批量生产的柔性自由行自动化生技术中,要求工业机器人对外部环境和对象物体有处适应能力,具有一定的“智能”,机器人的智能化是批机器人具有感觉、知觉等,既有很强的检测功能的判断功能。为此,必须规范性类似人类感觉传感器(如触觉传感器、视觉传感器、测距传感器等,)、发展式

传感器的信息融合技术，通过各种传感器得到关于工作对象的外部环境的信息，以及信息为中存储的数据、经验、规划的资料，以完成模式，用“专家系统”等智能系统进行问题求解，动作规划。

④研究机器人协作控制。先进制造技术的协作机器人学的研究与发展起着积极的促进作用。随着先进制造技术的，工业机器人已从当初的柔性上、下料装置正在成为高度柔性、高效率和可重组的装配制造的加工系统中的生产设备。在这样的生产线上，机器人是作为一个群体工作的，不论每个机器人在生产线上起什么作用，它总是作为系统中的一员而存在。而面向先进制造环境的机器人柔性装配系统和机器人加工系统中，不仅有多机器人的集成，还有机器人与生产、线周边设备、生产管理系统以及人的集成。因此，用系统的观点来发展新的机器人，有大量的理论与实践的工作要做。

#### (4) 发展工业机器人的意义

①机器人对外部环境的适应性强，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。只有根据工作环境条件进行合理设计，选用适当的材料和结构，工业机器人就可以在恶劣环境中工作。

②机器人能持久，耐劳，可以把人从繁重单调的环境中解脱出来，并能扩展和延伸人的功能。

③机器人动作准确性高，可保证稳定的提高产品质量。工业机器人不像人一样，容易受精神和心理因素的影响，它不会因为紧张、马虎、疲劳或视觉差等原因引起失误。

④机器人的通用性灵活性好，能满足产品品种迅速变化的要求，更重要的是对产品品种多样化，而且是层出不穷，不断发展。

⑤采用工业机器人后可明显提高劳动生产率和降低成本。

### 1.3.2 直角坐标机器人的发展情况

直角坐标机器人是工业机器人的一种，它已经广泛的应用于自动化生产中，它具有结构简单，运动直观性强，坐标方向位置精度容易控制，漂浮物精度较高；制造安装高速方便，容易实现数字控制。缺点是占据空间大而相应的工作范围较小。适用上下装卸工件和传送物料，易于成行排列布置与传送带配合使用。



## 1.4 选题的意义和目的及设计基本步骤

作为一名机械电子专业的学生，机器人是机械和电子结合得最紧密的产品，能够有机会认识和了解机器人的结构，我感到很荣幸。毕业设计是对大学四年以来所学的知识的一个总结，也是发挥自己的理论与实践相结合的一个很好的机会，为以后的工作打下了一个设计的基础，也是在为今后的就业做一次很好的准备，因此，毕业设计有十分重要的意义。

在设计直角坐标机器人的结构主要有以下几个步骤

### （1）了解机器人及其相关技术

由于目前机器人的数量还比较少并且应用不十分广泛，所以对机器人了解只是理论上的一些了解，并不十分系统。再进行结构设计之前，了解机器人的基本组成形式，各机器人都有什么样的特点，并且在工业生产中的具体工作形式。

### （2）了解直角坐标机器人的主要用途

机械设计的目的就是为了满足生产的需要，因此了解设计对象的主要用途是进行设计的必要准备。

### （3）根据用途运用所学知识进行结构设计

由于在毕业实习的时候没有看到过直角坐标机器人的具体结构，通过对 CA6140 机床刀架的观察和分析，根据其运动原理进行直角坐标机器人的结构设计。按照三个自由度进行设计，如空间一个物体在直角坐标系中运动，分为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向的运动。

### （4）融入我的设计思想使设计更具有特色

由于直角坐标机器人相对其它各类的机器人应用较为广泛，并已是成型的产品，为了培养自己的创新能力，在设计时提出了自己的设计思想使结构更加的合理。

## 1.5 本文研究的主要内容

本文以一种门式直角坐标机器人设计为主线，来研究直角坐标机器人的工作原理、结构形式。其三个自由度的运动基本原理很相似，在设计时为了使设计更加的多样化，采用不同的传动方式，第一、二自由度采用同步带传动，而第三自由自由度采用丝杠传动。第一、二自由度结构相似利于制造加工。随着科学技术的迅猛发展工业机器人得到了更为广泛的应用，特别是直角坐标机器人在数控加工中心中应用十分广泛，它已经成

为自动化生产的重要组成总部分。本文的第二、三、四章重点介绍设计过程。

## 二 直角坐标机器人的工作原理

### 2.1 实现三个自由度运动的基本原理

直角坐标机器人的主要功能就是能够使得末端执行器到达空间指定位置。待实现的工作空间大都为矩形空间。由笛卡尔坐标系的知识可知空间中的任意一点可以分别由 X、Y、Z 方向三个点的集合来表示。因此为了研究问题方便，可以把空间任意两点的曲线运动简化为分别在三个自由度方向的直线运动。

能够实现直线运动的原理有很多，在机械产品中得到应用的有以下几种，下表为它们之间传动性能的比较：

表 2-1 传动性能对比表

方案	优 点	缺 点
滚 珠 丝 杠	传动精度高，且速度平稳。摩擦阴力小，轴向冲击，钢性较好，可以传递较大扭力，位置准确	传动速度较慢，且机构不能自锁，长度较大时承受径向载荷能力差
齿 轮 齿 条	传递的功率大、速度范围广、效率高、工作可靠、寿命长、结构紧凑、能保证恒定传动比	制造及安装精度要求高，成本高，不适于两轴中心距过大的传动
同 步 带 传 动	传动准确，平稳，噪音小，可获得恒定速比，且速比范围大，允许线速度高，传动结构紧凑	对中心及其尺寸稳定性要求较高
液 压 传 动	可产生较大轴向力，传动速度快	结构复杂，维护困难，整个装车质量大。工作介质对周围条件反映敏感，直接影响定位精度
气 压 传 动	瞬间产生很大轴向力，传动速度快	对传动时间要求不易过长，密封困难

通过以上的分析，在本次设计中采用选择滚珠丝杆传动与同步带传动方式。

### 2.2 末端执行器抓取工件的基本原理

#### 2.1.1 概述

如今，查阅有关机械手的书籍，会发现的各类很多。按其抓取方式主要分为以下两种：[3]

### (1) 吸附式

#### ①空气负压吸盘

#### ②磁力吸盘

### (2) 手指式

#### ①平移式

#### ②回转式

针对众多的结构形式,选择的方法其实很简单。大部分是根据特定工作的要求专门设计的。例如,当确定手部大小、形状,手指个数以及动作自由度时,必须考虑被抓取物件的大小、形状、重量、材质、外力的物理条件以及旋转环境等。而这些又决定手部的抓取机能,即约束性、操作性和感觉性。[1]

约束性是指手爪对工件的约束和握紧程度。例如,广泛使用的二指手爪,在抓取水平旋转的圆棒工件时,手指只对圆棒半径方向进行约束,而轴向约束是借手指与圆棒工件之间的摩擦力来实现的。如果施加一个较大的轴向外力,工件就可能从手指中滑落出去。同样,圆棒工件圆周方向的回转也是靠摩擦力来限制的。

操作性是指手爪能够抓取的物件的几何特性,包括极限尺寸形状以及在抓取不同形式圆棒时能否保持同一中心线的同心特性。

感觉性是指手指对工件的控制能力定位精度等。例如,是否使用传感器,有无力学反馈等。最简单的一各形式利用微型开关来检测判断是否抓住工件。

在某种场合,一台机器人可以备有多种形状、用途和机能不同的数种可换手爪。

由于本次设计的工件是 1~3kg 的小工件所以综合各各方面考虑,选择手指式手部。

## 2.2.2 手指式手部的工作原理

手指式手部是由手指传动机构的驱动装置三部分组成,它对抓取工件的形状具有较大的适用性,可以抓取轴盘套类零件,一般情况下多采用二指,少数为三指或多指。驱动装置是为传动机构提供动力的,驱动源有液压、气动、电动等常见的传动机构往往通过滑槽、斜面、齿轮齿条、连杆等推动杠杆机构实现加紧或松开。

### (1) 手指式手部的分类

①按运动形式可分为平稳型和回转型两种。平移型手指的张开闭合靠手指的平行移动,适用于夹持平板、方料。在夹持不同的圆棒工件时,不会引起中心位置的偏移。但

这种手指的结构比较复杂，体积大，要求加工精度高。回转型指部的张开和闭合靠指根部的回转运动实现。驱轴支点为一个的，称为单支点回转型，为两个的，称双支点回转型。这种手指结构简单，形状小巧，但夹持不同工件会产生定位误差。

②按手指关节可分为无关节型、固定关节型和自由关节型。无关节指是一个平指构件，固定关节是指本件是一个具有固定弯曲角度的构件，一般成折线状。自由体关节本体分为指根和指尖两部分比较复杂。

③按指端形状可分为：V 型指，主要夹持圆柱形工件；平面指，夹持方形、板状和细小棒类工件；其它形状如圆形、钩型、尖型及其它与工件相适应特型指。

④按指面形式可分为：光滑型，指面平整光滑，用来夹持已加工完成表面光整的工件，避免碰伤；齿型，指面上有齿纹，增加摩擦力，确保夹紧牢靠，多用于夹持粗坯、半成品工件；柔性型，指面使用橡胶，增大摩擦力、保护工件表面作用。

## （2）对手指式手部的基本要求

①手指加紧力大小适宜，力量过大则动力消耗多，结构也庞大，不经济，甚至损坏工件；力量过小则夹持不住或产生松动、脱落。

②应具有足够的开闭角度或开闭距离，便于抓取和退出工件。

③应无可否认工件能准确定心或定位。

④在保证本身强度的前提下，尽可能使结构紧凑，重量轻，以利于减轻总负载。

⑤手部结构应能适应工作环境提出的特殊要求。如耐高温、耐腐蚀、能承受锻锤冲击力等。

通过以上的分析，同时考虑本设计的特点，本设计选择回转式手臂和直型指的结构。至于具体尺寸以及其它的设计计算问题将在下第三章中详细说明。

### 三 直角坐标机器人结构设计

本章主要系统的介绍直角坐标机器人的结构设计过程。其中包括各零部件形状以及主要设计参数的选择。为了使读者更好的了解直角坐标机器人的结构，依据实际产品的设计过程为主线来安排本章的结构。

#### 3.1 直角坐标机器人外形方案的确定

目前直角坐标机器人主要有两种结构形式。一种是门式直角坐标机器人，另一种是臂式直角坐标机器人。哪下表所示它们各自有特点：

表 3-1 两种机器人性能对比表

类型	优点	缺点
门式直角坐标机器人	可承受较大载荷，结构稳定	占据空间大
悬臂式破解坐标机器人	使用灵活方便，占据空间小	具有悬臂梁结构除第一根轴安装在基础上外其余各轴行程不易过长

鉴于此，选择了其中一种即门式直角坐标机器人进行结构设计。在这里需要指出的是，两种结构还存在一个共同的缺点就是一台机器人只能对应唯一的工作空间。

#### 3.2 直角坐标机器人传动及驱动方式的选择

##### 3.2.1 直角坐标机器人传动方式的选择

直角坐标机器人的母体（即三个自由度部件）的传动方式大体有四种，分别是滚珠丝杠传动方式、齿轮齿条传动方式、同步带传动方式、以及液压传动方式。在设计中选择了滚珠丝杠传动方式与同步带传动方式主要是因为滚珠丝杠具有精度高、摩擦阻力小、定位精度高，而同步带具有传动平稳、结构紧凑、可靠性能好的特点。至于其它方式在第二章中以做了详细的介绍，在这里就不重述了。

### 3.2.2 直角坐标机器人驱动方式的选择

直角坐标机器人的驱动系统是直接驱动使各运动部件动作的机构，对于机器人的性能的功能影响很大。如果没有有效的伺服驱动系统，无论机器人具有多高的智能和优越的传感器，也是无济于事的。

直角坐标机器人的驱动方式有三种：液压、电动和气压。这三种方式的比较如表 3-2 给出

表 3-2 三种驱动方式的特点比较表

项目	液压	气动	电动
输出力	油液压力大，抓取重量可达 100~800kg	压力较小，抓取重量一般小于 30kg	可得到中小程度输出力抓取重量为 1~200kg
传动性能	传动平稳，无冲击，反应灵敏，最高速度可达 2m/s	可达较高的速度，但高速时冲击较大	动作速度低。最高 1m/s
控制性能	可实现无级调速，达到较高定位精度	低速时不易控制，定位精度	步进、伺服电机的定位也较高
使用维护性能	温度对介质影响大，间接影响工作性能，会有不同程度漏油	适合在恶劣条件下工作，排气噪声大	使用维护方便
体积重量	在同样输出力的条件下体积小	压力小，体积大，输出力小	电机本身体积小减速装置体积大
寿命	润滑性能好，寿命长	空气无润滑性，寿命短	寿命较长
应用	适于抓取重量较大的机械手，可实现连续轨迹控制	抓取质量不易太大，但要求速度快	可适用于程序复杂运动要求严格的机器人

通过以上的比较可以看出，液压驱动方式具有输出力大、速度快、易控制、定位精度高的优点，但是液压系统较为复杂，同时对环境要求高。随着步进、伺服电机的发展，电动驱动逐渐体现出它的优点：动力源简单、维护使用方便又便于与计算机对接，能实现精确控制。鉴于以上的原因，选择了电伺服驱动的方式。对于门式直角坐标机器人，采用单边驱动的方式。

### 3.3 直角坐标机器人外形尺寸的确定

在设计之初，设计的参数为 0.8m×0.6m×0.3m。搬运工作质量为 1~3kg。根据以上的

设计要求初步估算各自由度部件的尺寸，如图 3-1 所示：

这里需要指出的是，第一自由度用户需要的行程 800mm 而设计的长度近 1.3 米如果第一处、自由度的跨度较大，则需要第二自由度的跨度相应增大，以减小阻力矩的影响。所以第一自由度的跨度为 800mm,第二自由度的跨度为 300mm。经验表明，如果采用单边驱动方式，则相邻自由度跨度之比小于 3：1。

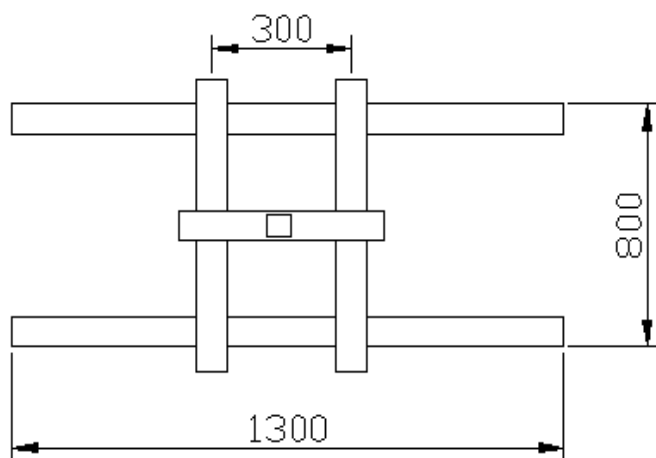


图 3-1 结构尺寸

### 3.4 传动部件、驱动部件类型及主要参数的选择

#### 3.4.1 传动部件参数的选择

由于选择了滚珠丝杠和同步带传动方式，应设计滚珠丝杠和同步带的主要参数。在计算之前，先将各自自由度的负载估算台下：第一自由度负载 80kg；第二自由度负载 50kg；第三自由度负载 20kg。

(1) 第一自由度传动部件的选择：

第一自由度带所受到的力主要上摩擦力，由第一自由度的负载估算为 80kg，在这里估算所受力为 60N，要求带传动的最高速度为 0.5m/s，传送的功率估计为 500W，带轮转速 100r/min。

1) 设计功率  $P_d$

由表[4, 14.1-55]查得  $K_A = 1.5$   $P_d = K_A P = 1.5 \times 0.5KW = 0.75KW$



## 2) 选定带型和节距

根据  $P_d = 0.75KW$  和  $n_1 = 100r/min$ ，由图[4,14.1-14]确定为 H 型，节距  $P_b = 12.7mm$

3) 确定小带轮齿数  $z_1$ 

根据带型 H 和小带轮转速  $n_1$  由表[4, 14.1-56]查得小带轮的最小齿数  $z_{\min} = 14$  在这里

取  $z_{\min} = 18$

4) 小带轮节圆直径  $d_1$ 

$$d_1 = \frac{z_1 P_b}{\pi} = \frac{18 \times 12.7}{\pi} mm = 72.77mm$$

由表[4, 14.1-60]查得其外径  $d_{a1} = d_1 - 2\delta = (72.77 - 1.372) mm = 71.39mm$

## 5) 在这里大带轮和小带轮相同，传动比为 1 因此大带轮的外径与小带轮相同所以有

$$d_2 = 72.77mm \quad d_{a2} = 71.39mm$$

6) 带速  $v$ 

$$v = \frac{\pi d_1 n_1}{60 \times 1000} = \frac{\pi \times 72.77 \times 100}{60 \times 1000} = 0.38m/s$$

7) 初定轴间距  $a_0$ 

$$\text{取 } a_0 = 1200mm$$

## 8) 确定带长及齿数

$$L_0 = 2a_0 + \frac{\pi}{2}(d_1 + d_2) + \frac{(d_1 - d_2)^2}{4a_0} = [2 \times 1200 + \frac{\pi}{2}(72.77 + 72.77)]mm = 2628.61mm$$

由表[4, 14.1-51]查得带长代号为 1100 的 H 型同步带，其节线长  $L_p = 2794mm$ ，节线长上的齿数  $z = 112$ 。

9) 实际轴间距  $a$ 

$$a \approx a_0 + \frac{L_p - L_0}{2} = [1200 + \frac{2794 - 2628}{2}]mm = 1283mm$$

10) 小带轮啮合齿数  $z_m$

$$z_m = \text{ent} \left[ \frac{z_1}{2} - \frac{P_b z_1}{2\pi^2 \times a} (z_1 - z_2) \right] = \text{ent} \left[ \frac{18}{2} \right] = 9$$

11) 基本额定功率  $P_0$

$$P_0 = \frac{(T_a - mv^2)v}{1000} \quad \text{由表[4, 14.1-58]查得 } T_a = 2100.85N, \quad m = 0.448kg/m$$

$$P_0 = \frac{(2100.85 - 0.448 \times 0.38^2) \times 0.38}{1000} = 0.798KW$$

12) 计算带宽  $b_s$

$$b_s = b_{s0} \sqrt[1.14]{\frac{P_d}{K_z P_0}} \quad \text{由表[4, 14.1-57]查得 H 型带 } b_{s0} = 76.2, \quad z_m = 9, \quad K_z = 1$$

$$b_s = 76.2 \sqrt[1.14]{\frac{0.75}{0.798 \times 1}} mm = 72.1mm \quad \text{由表[4, 14.1-52]查得, 应选带宽代号为 300 的 H 型}$$

带, 其  $b_s = 76.2mm$

13) 带轮结构和尺寸

传动选用的同步带为 1100H300;

$$z_1 = z_2 = 18 \quad d_1 = d_2 = 72.77mm \quad d_{a1} = d_{a2} = 71.39mm$$

(2) 第二自由度传动部件的设计

为了简化设计的步骤, 第二自由度的负载小于第一自由度的负载, 在这里估算所受  
力为 60N, 要求带传动的最高速度为 0.4m/s, 传送的功率为 400W, 带轮转速 100r/min。

1) 设计功率  $P_d$

$$\text{由表[4, 14.1-55]查得 } K_A = 1.5 \quad P_d = K_A P = 1.5 \times 0.4KW = 0.6KW$$

2) 选定带型和节距

根据  $P_d = 0.6KW$  和  $n_1 = 100r/min$ , 由图[4, 14.1-14]确定为 H 型, 节距  $P_b = 12.7mm$

3) 确定小带轮齿数  $z_3$

根据带型 H 和小带轮转速  $n_1$  由表[4, 14.1-56]查得小带轮的最小齿数  $z_{\min} = 14$  在这里

取  $z_{\min} = 16$

4) 小带轮节圆直径  $d_3$

$$d_3 = \frac{z_1 p_b}{\pi} = \frac{16 \times 12.7}{\pi} \text{ mm} = 64.68 \text{ mm}$$

由表[4, 14.1-60]查得其外径  $d_{a3} = d_3 - 2\delta = (64.68 - 1.372) \text{ mm} = 63.31 \text{ mm}$

5) 在这里大带轮和小带轮相同, 传动比为 1 因此大带轮的外径与小带轮相同所以有

$$d_4 = 64.68 \text{ mm} \quad d_{a4} = 63.31 \text{ mm}$$

6) 带速  $v$

$$v = \frac{\pi d_3 n_3}{60 \times 1000} = \frac{\pi \times 64.68 \times 100}{60 \times 1000} = 0.34 \text{ m/s}$$

7) 初定轴间距  $a_0$

$$\text{取 } a_0 = 1200 \text{ mm}$$

8) 确定带长及齿数

$$L_0 = 2a_0 + \frac{\pi}{2}(d_3 + d_4) + \frac{(d_3 - d_4)^2}{4a_0} = [2 \times 1000 + \frac{\pi}{2}(64.68 + 64.68)] \text{ mm} = 2006.28 \text{ mm}$$

由表[4, 14.1-51]查得带长代号为 840 的 H 型同步带, 其节线长  $L_p = 2133.6 \text{ mm}$ , 节线长上的齿数  $z = 96$ 。

9) 实际轴间距  $a$

$$a \approx a_0 + \frac{L_p - L_0}{2} = [1000 + \frac{2133.6 - 2006.28}{2}] \text{ mm} = 1063.66 \text{ mm}$$

10) 小带轮啮合齿数  $z_m$

$$z_m = \text{ent}[\frac{z_3}{2} - \frac{p_b z_3}{2\pi^2 \times a}(z_3 - z_4)] = \text{ent}[\frac{16}{2}] = 8$$

11) 基本额定功率  $P_0$

$$P_0 = \frac{(T_a - mv^2)v}{1000} \quad \text{由表[4, 14.1-58]查得 } T_a = 2100.85 \text{ N}, \quad m = 0.448 \text{ kg/m}$$

$$P_0 = \frac{(2100.85 - 0.448 \times 0.34^2) \times 0.34}{1000} = 0.71KW$$

12) 计算带宽  $b_s$

$$b_s = b_{s0} \sqrt[1.14]{\frac{P_d}{K_z P_0}} \quad \text{由表[4, 14.1-57]查得 H 型带 } b_{s0} = 76.2, z_m = 9, K_z = 1$$

$$b_s = 76.2 \sqrt[1.14]{\frac{0.6}{0.71 \times 1}} mm = 65.74mm \quad \text{由表[4, 14.1-52]查得, 应选带宽代号为 300 的 H 型}$$

带, 其  $b_s = 76.2mm$

13) 带轮结构和尺寸

传动选用的同步带为 840H300;

$$z_3 = z_4 = 16 \quad d_3 = d_4 = 64.68mm \quad d_{a3} = d_{a4} = 63.31mm$$

(3) 第三自由度传动部件设计

由于第三自由度为竖直方向, 通过对传动部件的分析, 不适合采用带传动, 因此, 采用丝杠传动, 丝杠的轴向力为第三自由度负载的全部作用力, 于是, 丝杠的轴向载荷为 200N。必要的条件为: 丝杠载荷  $F_a = 200N$ ; 电机最大转速  $n=3000r/min$ ; 丝杠导程  $P_h=10mm$ ; 当量转速  $n_m = 1500r/min$  (考虑在运动过程中, 轴向载荷较小, 电机转速较高, 这里简化取当量转速为  $1500r/min$ ); 当量负载  $F_m = F_a = 200N$  (根据运动中负载不变和原则)。

1) 计算动负载[5]

$$\text{由公式 } C_{aj} = \frac{K_h}{K_n f_\Sigma} F_m$$

其中:  $K_h$  寿命系数,  $K_h = \left(\frac{L_h}{500}\right)^{\frac{1}{3}}$

$$K_n \text{ 转速系数, } K_n = \left(\frac{33.3}{n}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$L_h \text{ 要求寿命, } L_h = 300 \times 16 \times 10 = 48000h$$

$$f_{\Sigma} \text{ 综合系数, } f_{\Sigma} = \frac{f_t f_h f_a f_k}{f_w}$$

其中：查表 3-3 得  $f_t = 1$ ；查表 3-4 得  $f_h = 1$ ；查表 3-5 得  $f_a = 0.7$ ；查表 3-6 得  $f_w = 1.2$ ；

查表 3-7 得  $f_k = 1$

表 3-3 温度系数  $f_t$

工作温度	小于 100	125	150	175	200	225	250
$f_t = 1$	1	0.95	0.90	0.85	0.80	0.75	0.70

表 3-4 硬度系数  $f_h$

硬 度	» 58	55	52.5	50	47.5	45	40
$f_h$	1.0	1.11	1.35	1.56	1.92	2.4	3.85

表 3-5 精度系数  $f_a$

精度等级	1、2、3	4、5	7	10
$f_a$	1.0	0.9	0.8	0.7

表 3-6 负载性质系数  $f_w$

负荷性质	无冲击平稳运转	一般运动	有冲击和振动运转
$f_w$	1-1.2	1.2-1.5	1.5-2.5

表 3-7 可靠性系数  $f_k$

可靠度	90	95	96	97	98	99
$f_k$	1.00	0.62	0.53	0.44	0.33	0.21

经计算，得  $f_{\Sigma} = 0.58$

因此得到  $C_{aj} = 2100N$

选用 RNBS 标准型螺帽精度转造滚珠丝杠副，其型号为 RNBS2510A，其额定动载荷为  $3.24KN > 2.1KN$ ，符合要求

根据竖直方向的工作行程为 300mm，选用标准螺杆长度 500mm 的滚珠丝杠副。

2) 不发生共振临界转速校核:

$$n_c = \frac{30f_2^2}{\pi L_c^2} \sqrt{\frac{EJ}{\rho A}} K_2 (r/\min)$$

式中 E—材料的拉、压弹性模量，钢的  $E = 2.1 \times 10^{11} N/m^2$ ;

J—丝杠轴最小截面惯性矩 ( $m^4$ );  $J = \frac{\pi}{64} d_2^4$

A—丝杠轴最小截面面积;  $A = \frac{\pi}{4} d_2^2 (m^2)$

$L_c$ —临界转速计算长度 (m);

$\rho$ —材料密度钢的  $\rho = 7.8 \times 10^3 (kg/m^3)$ ;

$K_2$ —安全系数，取  $K_2=0.8$ ;

将 E、J、A、 $\rho$ 、 $K_2$  的值代入  $n_c = \frac{30f_2^2}{\pi L_c^2} \sqrt{\frac{EJ}{\rho A}} K_2 (r/\min)$  得  $n_c = 9910 \frac{f_2^2 d_2}{L_c^2} (r/\min)$

其中：查表 3-8 得： $f_2=3.927$ ,

由滚珠丝杠副参数知：丝杠螺纹底径  $d_2 = 20.05 \text{ mm}$

临界转速长度： $L_c = 600 \text{ mm}$

经计算得  $n_c = 5107$ ， $n_c > n_{\max}$  符合要求

表 3-8 支撑方式系数

支撑方式	一端固定一端自由	一端固定一端游动	两端固定
$f_1$	0.25	2.00	4.00
$f_2$	1.875	3.927	4.730
适应范围	低速短轴垂直安装	中速、较高精度	高速、高精度、高刚度

3) 临界压缩载荷校核:

不发生失稳的最大压缩载荷，以  $F_c$  表示，按欧拉公式计算

$$F_c = \frac{f_1 \pi^2 EJ}{L_0^2} K_1 (N)$$

式中  $E$ 、 $J$ 、 $d_2$ —含义同上；

$L_0$ —最大受压长度 (m)；

$f_1$ —丝杠支承方式系数；

$K_1$ —安全系数，取  $K_1 = \frac{1}{3}$ ；

将  $E$ 、 $J$ 、 $K_1$ 、 $\pi$  的值代入上式可简化得

$$F_c = 3.4 \times 10^{10} \frac{f_1 d_2^4}{L_0^2} (N)$$

其中：查表 3-8 得：  $f_2 = 2.00$ ，

由滚珠丝杠副参数知：丝杠螺纹底径  $d_2 = 20.05 \text{ mm}$

临界转速长度：  $L_0 = 850 \text{ mm}$

经计算得  $F_c = 15.2 \text{ kN}$ ，  $F_a < F_c$  符合要求。

### 3.4.2 驱动部件的选择

#### (1) 控制电机的概述

随着自动控制系统和计算装置的，在普通旋转电机的基础上产生出多种具有特殊性能的小功率电机，它们在自动控制系统和计算装置中分别作为执行元件、检测元件和解算元件，这种电机统称为控制电机。控制电机与普通旋转电机的基本工作原理没有本质上的区别，但普通旋转电机着重于对起动和运行状态力能指标的要求，而控制电机则着重于特性的高精度和快速响应。

控制电机的输出功率一般较小，通常从数百毫瓦到数百瓦，系列产品的机壳外径一般由 12.5mm 到 130mm，重量从数十克到数千克，这类电机也称微电机或微控电机。在大功率的自动控制系统中，有些控制电机的输出功率也可达数十千瓦，机壳外径达数百毫米。[5]

控制电机已成为现代机电一体化的工业自动化系统以及军事装备中必不可少的重要元件。它与一些典型环节进行适当组合，就可以构成不同用途的伺服系统和解算元件。控制电机的用途与分类如下表表示

表 3-9 电机的分类与用途

电机名称	用 途
交、直流伺服电动机	堵转转矩与信号电压成正比，转速随转矩的增加而均匀下降。在系统中，通过齿轮带动负载，作为执行元件
步进电动机	定子上有多相绕组，由专门电源供给电脉冲。角位移与接受的电脉冲数成正比，转速与每秒电脉冲数成正比。一般须开环系统中作执行元件
力矩电动机	能长期在堵转矩状态下工作，低速运行时，能产生足够大的转矩。在系统中作用直接驱动负载的执行元件
电机扩大机	用输入端较小的功率变化来控制输出端较大的功率变化。在系统中作用功率放大元件
低速电动机	不需齿轮减速，每分钟公仅可转数十转。其转动惯量小，起动、停止快。通入交流电可低速旋转，通过脉冲可步进运转。在系统中可作为直接驱动负载的执行元件

由上述可知，第一、二自由度的电机选用步进电机，第三自由度选用伺服电机。由第一自由度的受力及带轮的尺寸可知，所需转矩为  $T=2.18\text{Nm}$ ，在考虑振动、波动、过载等因素等，取电机的驱动转矩  $1.5T$ ，选择永磁感应式步进电动机其型号为 110BYG450A,[5, 1.2-22]步进角 1.8 度，最大转矩 10.3Nm。由于第二自由度的负载小于第一自由度负载，为了使设计简化，第二自由度采用同样型号的电机。

第三自由度采用丝杠传动，所以轴向力即为负载的重力。驱动力就主要由三部分组成，即个载荷产生的摩擦力矩  $T_F$ 、丝杠副预紧力摩擦力矩  $T_0$ 、惯性力矩  $T_G$ 。

(1) 外载荷产生的摩擦力矩  $T_F$

$$T_F = \frac{F_a P_h}{2\pi \eta_0}$$

其中：  $T_a$ —轴向载荷；

$\eta_0$ —预紧时的传动效率。对 1、2、3 级精度丝杠副，取 0.9；4 级以下精度取 0.85；

(2) 丝杠副预紧力摩擦力矩  $T_0$

$$T_0 = \frac{F_{a0} P_h}{2\pi} \frac{1 - \eta_0^2}{\eta_0}$$

其中：  $P_h$ —基本导程；

$F_{a0}$ —预加载荷；



(3) 惯性力矩  $T_G$

$$T_G = \frac{\pi n_m J_M}{30 t_a}$$

其中：  $J_M$ —折合到电动机轴上的总的转动惯量；

$n_m$ —电动机当量转速；

$t_a$ —加速时间；

折合转动惯量按下式计算：  $J_M = J_m + \sum J_i \left( \frac{\omega_i}{\omega_m} \right)^2 + \sum m_i \left( \frac{V_j}{\omega_m} \right)^2$

其中：  $J_m$ —电动机转动惯量；

$J_i$ —各转动件转动惯量；

$\omega_i$ —各转动件角速度；

$m_i$ —各直线运动件的质量；

$V_j$ —各直线运动件的速度；

由上式可得到，外载荷产生的摩擦力矩  $T_F = 0.37 \text{Nm}$ ；丝杠副预紧力摩擦力矩  $T_0 = 0.04 \text{Nm}$ ；其中  $F_{a0} = \frac{1}{3} F_a = 68$ ；第三自由度总负载估算  $20 \text{kg}$ ； $t_a$  的确定需要作轨迹规划。

直角坐标机器人的轨迹规划：

由于直线导轨的运行距离较长，做抛物线—直线—抛物线形式的轨迹规划。[6]

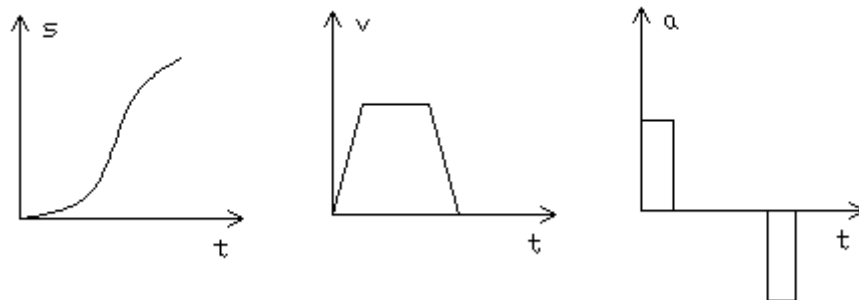


图 3-2 轨迹规划图

如上图可知加速度是不变的，则加速时间为最快速度与加速度之比。取加速度为

0.2g, 则上长时间为 0.255s.

于是得惯性转矩  $T_G = 0.08Nm$

于是驱动力矩  $T_M = T_G + T_0 + T_F = 0.37 + 0.04 + 0.08 = 0.49Nm$

在综合考虑其它因素的影响, 取电机的驱动力矩  $1.5T_M$  选交流伺服电机 60CB 系列, 其型号为: 60CB020C 功率 200W 转矩 0.64Nm。同时加 PLS80 精密行星减速器减速比  $i = 3$ 。

### 3.5 其它辅助部件的设计

#### 3.5.1 直线导轨的选择

##### 1) 导轨类型的选择原则

①精度互不干涉原则: 导轨的各项精度制造和使用时互不影响才易得到较高的精度。如矩形导轨的直线性与侧面导轨的直线性在制造进互不影射; 又如平—V 导轨的组合, 上导轨(工作台)的横向尺寸的变化不影射导轨的工作精度。

②静、动摩擦系数相接近的原则: 例如选用滚动导轨或塑料导轨, 由于摩擦系数小且静、动摩擦系数相近, 所以可获得低的运动速度和很高的重复定位精度。

③导轨能自动贴合的原则: 要使导轨精度高, 必须使相互结合的导轨有自动贴合的性能。对水平位置工作的导轨, 可以靠工作台的自重来贴合; 其他导轨靠附加的弹簧力或者滚轮的压力使其贴合。

④移动导轨(例如工作台)在移动过程中, 始终全部接触的原则: 也就是固定的导轨长, 移动的导轨短。

⑤对水平安置的导轨, 以下导轨为基准, 上导轨为弹性体的原则: 以长的固定不动的下导轨为刚性较强的刚体为基准, 移动部件的上导轨为能具有一定变形的弹性体。

⑥能补偿因受力变形和受热变形的原则: 例如龙门式机床的横梁导轨, 将中间部位制成凸形, 以补偿主轴箱(或刀架)移动到中间位置进的弯曲变形。[7]

第一、二自由度的受力主要由径向的压力引起的摩擦力, 因此, 选择凹形对称 V 形导轨, 其有导向精度高, 磨损后能自动补偿, 易保存润滑油, 高低速均可采用的特点。V 形导轨的尺寸为  $B=20$ ,  $b=2$ ,  $\alpha=90^\circ$ 。第一、二自由度分别采用四根导轨。第三自由

度采用两根微型直线导轨。

### 3.5.2 滚动轴承的选择

在选择轴承时，首先要选择轴承类型，可以根据常用标准轴承的基本特点进行选择，同时在选择轴承时还要考虑以下主要因素。

#### ①轴承的载荷

根据载荷的大小选择轴承类型时，由于滚子轴承中主要元件间是线接触，宜用于承受较大的载荷，承载后变形也较小。而球轴承中则主要为点接触，宜用于承受较轻的或中等的载荷，在载荷较小时，可优先选用球轴承。

根据载荷的方向选择轴承类型时，对于纯轴向载荷，一般选用推力轴承。较小的纯轴向载荷时，可选用推力轴承；较大的纯轴向载荷可选用推力滚子轴承，对于纯径向载荷，一般选用深沟球轴承、圆柱滚子轴承或滚针轴承。当承受径向载荷的同时，还有不大的轴向载荷时，可行用深沟球轴承或接触角不大的角接触球轴承或圆锥滚子轴承；当轴向载荷较大时可选用接触角较大的角接触球轴承或圆锥滚子轴承，或者选用向心轴承和推行为轴承组合在一起的结构，分别承担径向载荷和轴向载荷。

#### ②轴承的转速

在一般转速下，转速的高低对类型的选择不发生什么影响，只有在转速较高时，才会有比较显著的影响。

#### ③轴承的调心性能

当轴的中心线与轴承座中心线不重合而有角度误差时，或因轴受弯而弯曲或倾斜时，会造成轴承的内外圈轴线发生偏斜。这时采用有一定调心性能调心轴承或带座外球面球轴承。

#### ④轴承的安装和拆卸

便于装拆，也是在选择轴承类型时应考虑的一个因素，在轴承座没有部分面而必须沿轴向安装和拆卸轴承部件时，应优先选择内外圈可分离的轴承（如 N0000、NA0000、30000 等）。[8]

根据以上的要求可知，由于在本传动中，第一、二自由度分别用带传动，其承受的轴向力较小，主要承受径向力为主，因此，对于第一、二自由度选用深沟球轴承，为了

设计简化采用相同的型号；而第三自由度主要心承受轴向载荷为主，所以采用现个角接触球轴承对背安装。由以上的分析，选用的轴承为 6205，7202AC。[9]

### 3.5.3 机器人拖链的选择

机器人采用 PFP 系列拖链。其主要参数如下：内腔尺寸：15×30 外腔尺寸 20×30 弯曲半径 28。拖链的长度  $L=1000\text{mm}$ 。

### 3.5.4 其它部件的设计

其它部件都已经给出图纸，可按照图纸加工，其中技术要求在图中已注明。

## 3.6 机械手结构设计

### 3.6.1 机械手的结构特点

机械手的手部结构具有以下特点：

- (1) 手部的工作范围较大。
- (2) 该机构为省力机构。
- (3) 结构简单，抓取方形物体。

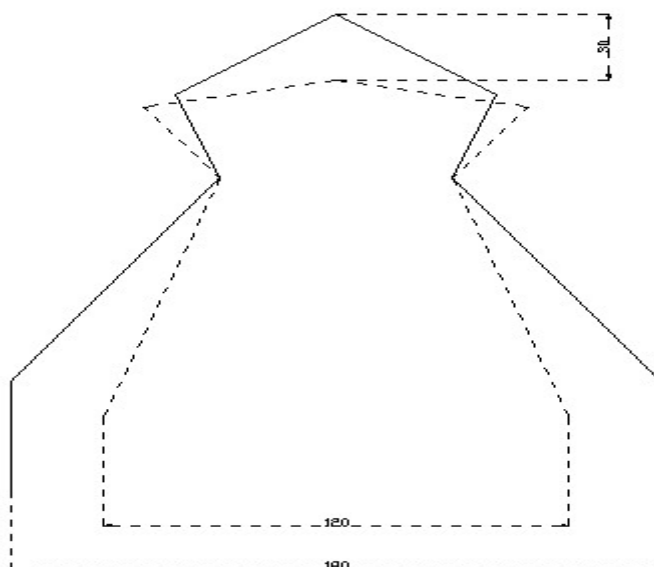


图 3-3 机械手抓取范围简图

### 3.6.2 机械手的手部尺寸及抓取范围

根据负载大小，估计工件的结构尺寸。由于采用直指结构，只能夹取矩形工件。设工件为钢质，根据密度可计算出夹取工件的体积为  $3.8 \times 10^{-4} m^3$ 。机械手手部抓取范围如上图所示。

### 3.6.3 机械手传动装置的设计

由于机械手传动装置的移动距离比较短，所以传动选择滑动丝杆的传动装置。这里取最大的驱动力为 300N。

(1) 材料的选择

螺杆 45 号钢， $\sigma_s = 355 MPa$ ；选择梯形螺纹  $\beta = 15^\circ$

(2) 由耐磨性计算  $d_2$

取  $\psi = 2$ ，对于梯形螺纹[10]

$$d_2 \geq \xi \sqrt{\frac{F}{\psi[P]}}$$

其中：F—驱动力（N）

[P]—许用压强（MPa）由表[10，22.4-7]得[P]=8MPa

$d_2$ —丝杆中径（mm）

$\xi$  梯形螺纹时  $\xi = 0.8$

经过计算得  $d_2 \geq 3.46 mm$

根据标准的梯形螺纹，查书[10,21.1-14]选择螺纹的公称直径  $d=20mm$ ，螺距  $P=2mm$ ，小径  $d_1=17.5mm$ ，中径  $d_2=19mm$

(3) 自锁性验算

$$\text{由公式可知当量摩擦角 } \rho' = \arctan \frac{f}{\cos \frac{\alpha}{2}}$$

其中： $\rho'$ —当量摩擦角

f—摩擦系数，查表[10，22.4-6]，得  $f=0.15$

$\alpha$  —牙形角，这里  $\alpha = 30^\circ$

则计算得当量摩擦角  $\rho' = 8^\circ 24'$

$$\text{螺纹升角 } \lambda = \arctan \frac{S}{\pi d_2}$$

其中：S—导程（mm），这时取单线，则  $S=P=2\text{mm}$

经计算可得螺纹升角  $\lambda = 1^\circ 55'$

这里  $\lambda < 8^\circ 24'$ ，能满足要求。

（4）螺杆强度计算

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{4F}{\pi d_1^2}\right)^2 + 3\left(\frac{T}{0.2d_1^3}\right)^2}$$

其中：T—传递转矩（Nm）， $T = \frac{Fd_2}{2} \tan(\lambda + \rho') = 0.51\text{Nm}$

$\sigma$  —当量应力（MPa），

将各参数代入上式可得  $\sigma = 1.33\text{MPa}$ ，查表[10，22.4-8]得  $[\sigma] = \frac{\sigma_s}{3-5}$  计算得

$[\sigma] = 118-71 \text{ (MPa)}$ ， $\sigma < [\sigma]$  满足要求，

经过上述的计算可知，选用的丝杆可满足要求，丝杆长度为 80mm.丝母长度为 40mm。

### 3.6.4 机械手驱动装置的选择

机械手采用伺服电机驱动，机械手需要垂直安装，同上述计算可知，传动的力矩为 0.51Nm，在综合考虑其它因素的影响，取电机的驱动力矩 1.2T，选择交流伺服电动机，60CB 系列，其型号为：60CB020C,功率 200W,转矩 0.64Nm

### 3.6.5 机械手其它部件的选择

机械手丝杆主要受力为轴向力。所以选择两个角接触轴承背对背安装。其型号为 7202AC。至于其它的附件的设计在图纸中已经给出，详见图纸。

## 四 机器人的校核及结构的可靠性分析

### 4.1 轴承的校核

取第一自由度进行轴承校核,工作按每天 16 小时每年工作 300 天,工作 10 算寿命,可知预期寿命为 48000h,由设计手册可知,同步带的预紧力为 1047N,采用深沟球轴承,由受力分析得,每个轴承所受力为 1077N,,根据设计手册[9],6205 轴承的基本额定载荷为,  $C_r = 14.0KN$ ,  $C_{0r} = 7.88KN$

(1) 当量动载荷 P[8]

$$P = f_p F_r$$

其中:  $f_p$ —载荷系数,这里取为 1.2

$F_r$ —径向力,  $F_r=1077N$

在这里只考虑径向力的作用,忽略轴向力作用。

计算得当量动载荷为  $P=1292.4N$

(2) 验算寿命

$$L_h = \frac{10^6}{60n} \left( \frac{C_r}{P} \right)^3$$

其中:  $n$ —带轮转速,这里取最大转速为 500r/min

$C_r$ ,  $P$ —基本额定动载荷,当量载荷。

计算得  $L_h = 73217h > 48000h$ ,计算寿命满足预期的寿命,因此轴承可以满足要求。

### 4.2 各主要功能部件的可靠性分析

直角坐标机器人各个主要功能部件的选择与计算在上一章已经做了详细的介绍,其间为了确定零部件的型号曾经做了下面的假设,汇总在表 4-1 中。在设计完成后,经过计算,得到了部件的重量汇总在表 4-2 中。通过对两个表的对比可以看出,按假设选定的各个部件都可以满足使用的要求。

表 4-1 部件估算质量表

部件	质量
机械手及负载	20kg
第二自由度及负载	70kg
第三自由度及负载	100kg

表 4-2 部件实际质量表

部件	质量
机械手及负载	18kg
第二自由度及负载	56kg
第三自由度及负载	71kg

### 4.3 各自由度间连接件的可靠性分析

由于各个自由度之间都使用螺栓连接，现就连接螺栓进行强度校核。各个自由度的连接都采用受横向载荷的螺栓组连接，可按下式进行校核

$$Q_p \geq \frac{K_f R}{fzm}$$

其中：f—结合面间摩擦系数，取 f=0.15

m—为结合面对数

$K_f$ —可靠性系数，取  $K_f=1.2$

$Q_p$ —每个螺栓的轴向载荷

R—外载荷

z—螺栓个数

$$\text{所选取的螺栓的直径为 } d_1 \geq \sqrt{\frac{4 \times 1.3 Q_p}{\pi [\sigma]}}$$

其中： $[\sigma] = \frac{\sigma_s}{S}$ ；S 为安全系数，

经过计算：

对于一、二自由度连接螺栓  $d_1 \geq 3.14mm$ ，这里取 M8 可满足要求。

对于二、三自由度连接螺栓  $d_1 \geq 3.38mm$ ，取 M8 螺栓可满足要求。



对于第三自由度和机械手连接螺栓  $d_1 \geq 3.38\text{mm}$ ，取 M8 可满足要求。

#### 4.4 轴的校核计算

由轴的受力可知，在此设计中，轴的受力不大，在进行校核时采用，弯扭合成强度条件进行校核，由带轮的受力可知，只有在水平面上受到力的作用，而在竖直面忽略带轮的作用力，根据其结构画出了轴的零件简单图如下图 4-1，其受力结构简图如图 4-2。

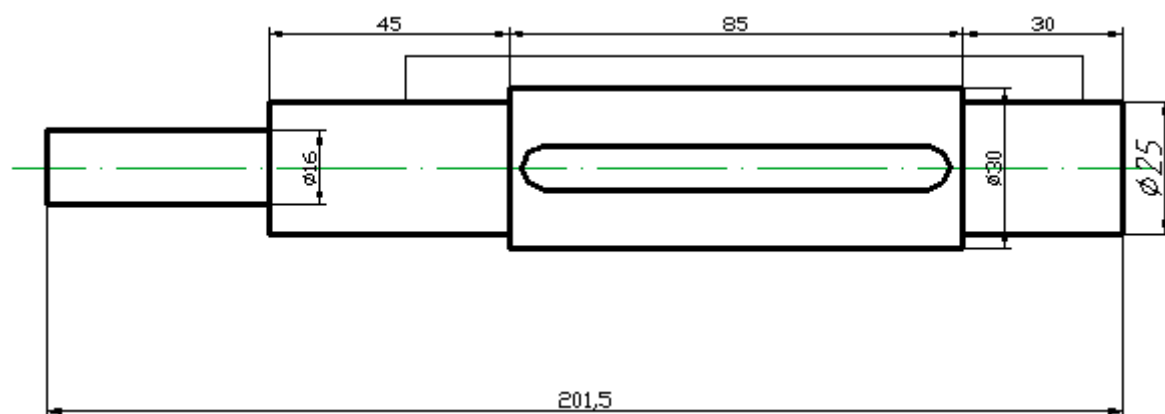


图 4-1 轴结构图



图 4-2 受力结构简单图

由带轮的预紧力，与工作的拉力可知，图中  $F_0 = 2154\text{N}$ ，由力与力矩平衡关系可以得出  $F_1 = 1102.4\text{N}$ ， $F_2 = 1051.6\text{N}$ ，此轴的扭矩  $T$  由上述计算可知为  $T=2180\text{Nmm}$ ，根据上述条件可画出弯矩图与扭矩图如下 4-3 所示。

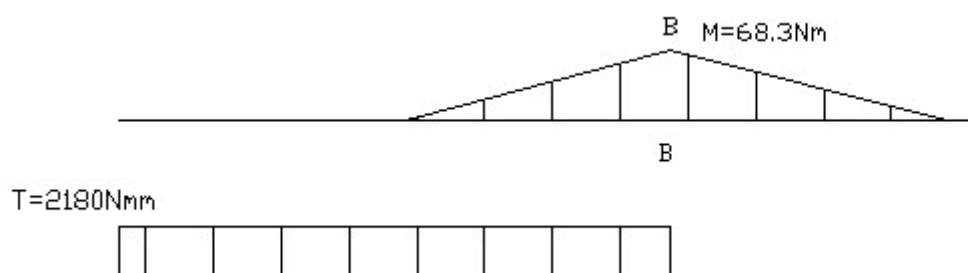


图 4-3 轴的载荷分析图

已知轴的弯矩和扭矩后，可以判断出在图中所示的 B-B 截面的左侧为危险截面，对此处做弯扭合成强度校核计算，按第三强度理论计算应力[11]

$$\sigma_{ca} = \frac{\sqrt{M^2 + (\alpha T)^2}}{W} \leq [\sigma_{-1}]$$

其中： $\sigma_{ca}$ —轴的计算应力（MPa）

M—轴所受的弯矩（Nmm）

T—轴所受的扭矩（Nmm）

$[\sigma_{-1}]$ —对称循环变应力时轴的许用弯曲应力，由表[8，15-4]得， $\sigma_{-1}=55\text{MPa}$

$\alpha$ —折合系数，这里取为  $\alpha=1$

W—轴的抗弯截面系数（ $\text{mm}^3$ ），这里  $W = \frac{\pi d^3}{32} - \frac{bt(d-t)^2}{2d}$ ，b、t 为键的尺寸

b=8mm、t=4mm

经过计算可得，计算应力  $\sigma_{ca} = 29.84\text{MPa}$ ，

$\sigma_{ca} \leq [\sigma_{-1}]$  满足设计要求合格

## 五 机器人的控制

### 5.1 步进电机的概况

步进电机是一种把电脉冲信号转换成角位移的电气机械。电脉冲的数量代表了转子的角位移量，转子的转速与电脉冲的频率成正比，旋转方向取决于脉冲的顺序，转矩是由于磁阻作用所产生。步进电机一定要与控制脉冲联系起来才能运行，否则无法工作。对定子绕组所加电源形式既不是正弦波交流也不是恒定直流，而是电脉冲电压、电流，所以也称为脉冲电机或脉冲马达。步进电机用于与控制脉冲组成的开环系统中。

步进电机的分类方法有很多，按作用原理分，步进电机有磁阻式（反应式）、感应子式和永磁式三大类。按输出功率和使用场合分类，分为功率步进电机和控制步进电机。按结构分类，分为径向式（单段式）、轴向式（多段式）和印刷绕组式步进电机，按相数分类，分为三相、四相、五相、六相等。

### 5.2 步进电机的工作原理

以磁阻式（反应式）步进电机为例，其工作原理是按电磁吸引原理工作的。用图 5.1 所示的反应式三相步进电机为例加以说明。当某一相定子绕组加上电脉冲，即通电时，该相磁极产生磁场，并对转子产生电磁转矩，将靠近定子通电绕组磁极的转子上一对齿吸引过来，当转子一对齿的中心线与定子磁极中心线对齐时，磁阻最小，转矩为零，停止转动，如果定子绕组按顺序轮流通电，A、B、C 三相的极就依次产生磁场，使转子一步步按一定方向转动起来。

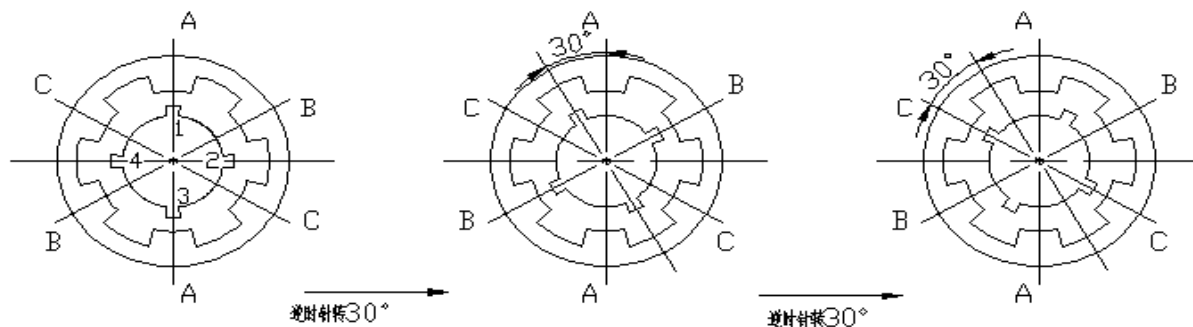


图 5.1 步进电机工作原理图

假设每个定子磁极有一个齿，转子有四个齿，首先 A 相通电，B、C 二相断电，转子、3 齿按磁阻最小路径被 A 相磁极产生的电磁转矩吸引过去，当 1、3 齿与 A 相对齐时，转动停止；此时，B 相通电，A、C 二相断电，磁极 B 又把距它最近的一对齿 2、4 吸引过来，使转子按逆时针方向转过  $30^\circ$ 。接着 C 相通电，A、B 二相断电，转子又逆时针旋转  $30^\circ$  依此类推，定子按  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A \cdots$  顺序通电，转子就会一步步地按逆时针方向转动，每步  $30^\circ$ 。若改变通电顺序，按  $A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A \cdots$  使绕组通电，步进电机就按顺时针方向转动，同样每步转  $30^\circ$  这种控制方式叫单三拍方式。由于每次只有一相绕组通电，在切换瞬间失去自锁转矩，容易失步，此外，只有一相绕组通电吸引转子，易在平衡位置附近产生振荡，太实际不采用单三拍工作方式，而采用双三拍控制方式。

双三拍通电顺序按  $AB \rightarrow BC \rightarrow CA \rightarrow AB \rightarrow \cdots$ （逆时针方向）或按  $AC \rightarrow CB \rightarrow BA \rightarrow AC \rightarrow \cdots$ （顺时针方向）进行，由于双三拍控制每次有二相绕组通电，而且切换时总保持一相绕组通电，所以工作较稳定。[12]

### 5.3 步进电机的控制

如图 5-2 所示为步进电机控制示意图。它把电脉冲信号变换成角位移或直线位移，其角位移量  $\theta$  或直线位移量  $S$  与电脉冲成正比，其转数  $n$  或线速度  $v$  与脉冲频率  $f$  成正比。由步进电机的控制特性可见，在额定负载范围内，角位移量  $\theta$  或直线位移量  $S$  转速  $v$  不因电源电压、负载大小、环境条件的波动而变化，因而很适合在开环系统中作执行元件，使控制系统成本下降。[13]

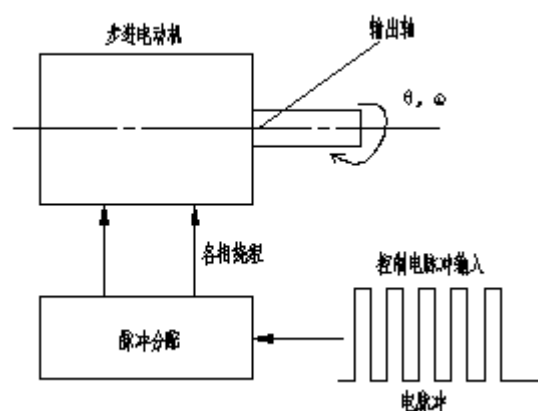


图 5-2 步进电机控制示意图

## 5.5 直角坐标机器人的控制方式

### 5.3.1 步进电机专用控制芯片的概述与特性

PMM8712/PMM8723/PMM8714 是用于驱动步进电机的专用控制芯片。PMM8713 是单片 CMOS（互补金属氧化物半导体——一种大规模应用于集成电路芯片制造的原料）芯片用于控制三相和四相步进电动机；PMM8723 是表面安装器件，用于控制二相步进电动机，是 PMM8713 的简化设计，价格低于 PMM8713；PMM8714 是单片 CMOS 芯片，用于控制五相步进电动机。使用 PMM8713/PMM8723/PMM8714 专用芯片可以大大简化步进电机控制设计，只需要另外加振荡器、功率开关三极管和直流电源，即可构成步进电动机的驱动单元。

PMM8713、PMM8723、PMM8714 芯片特性的比较

#### 1.控制步进电机工作方式

PMM8713 可提供六种励磁方式：4 相输出—1 相励磁；2 相励磁；1-2 相励磁。3 相输出—1 相励磁；2 相励磁；1-2 相励磁。

PMM8723 可提供下列两种励磁方式：1-2 相励磁；2 相励磁。

PMM8714 可提供下列 6 种励磁方式：4 相励磁；4-5 相励磁；5 相励磁；2 相励磁；2-3 相励磁；3 相励磁

#### 2.电源电压范围

$V_{DD}=4\sim 18V$ （PMM8713/PMM8714）

$V_{DD}=5V$ （PMM8723）

#### 3.输出电流

源极或漏极输出电流最小为 20mA。

#### 4.抗干扰能力强

所有输入端内部都设置施密特电路。

#### 5.两种类型脉冲输入方式

（1）2 输入端（CW 和 CCW 输入方式）。

（2）1 输入端 1 切换端（CK 和 U/D 输入方式）。

#### 6 有励磁判断功能

PMM8723/PMM8714 可置所有输出信号为低电平。

#### 7.复位功能

PMM8723/PMM8714 可置励磁状态返回到相初始状态。

#### 8.相原点监视

PMM8723 在相的初始状态  $Z_0$  输出低电平信号（输出是复位方式）。

PMM8714 在相的初始状态  $Z_0$  输入高电平信号（输入是复位方式）。

#### 9.励磁监视

PMM8713 和 PMM8714 的 E 脚输出可说明控制器的工作方式。

#### 10.输入脉冲监视

PMM8713 的  $C_0$  脚输出可监视输入脉冲信号。

### 5.3.2 专用芯片的选择及电路设计

根据所选电机的型号，可知电机的相数为四相，根据起用芯片的特性可知，选用 PMM8713 芯片，其芯片形状如图 5-3 所示，其中各个管脚功能如表 5-1 所示。

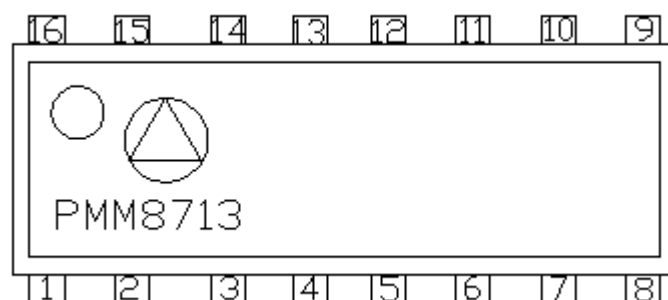


图 5-3PMM8713 芯片脚形

管脚编号	符号	功能	管脚编号	符号	功能
1	$C_U$	输入脉冲 $U_p$ 时钟	9	$\bar{R}$	复位
2	$C_D$	输入脉冲 DOWN 时钟	10	$\phi_4$	输出（四相时用）
3	$C_K$	输入时钟	11	$\phi_3$	输出
4	U/D	方向切换 0—反转 1—正转	12	$\phi_2$	输出

5	$E_A$	励磁方式 切换控制	13	$\phi_1$	输出
6	$E_B$		14	$E_M$	励磁监视
7	$\phi_C$	3、4 相选择	15	$C_o$	输入脉冲监视
8	$V_{SS}$	0V (地)	16	$V_{DD}$	电源 (+4~+18)

表 5-1PMM8712 管脚功能

驱动线路的设计

根据步进电动机的型号，设计驱动电路如图 5-4（其中各个符号在图中以有标明）。

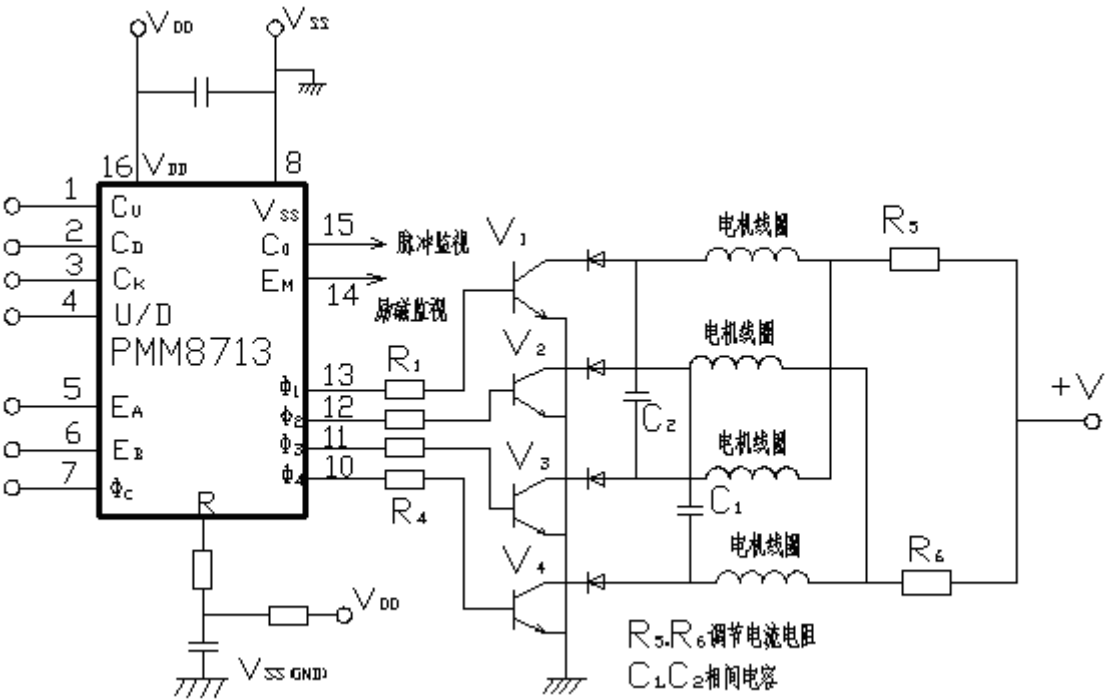


图 5-4 驱动线路图

根据上述分析可知若四相电机通电顺序采用  $AB \rightarrow BC \rightarrow CD \rightarrow DA \rightarrow AB \rightarrow \dots$  此方式，则在通电总能够保持一相绕组通电，工作状态稳定，在切换瞬间不容易产生失步。采用四相八拍控制方式。通过上面的设计，可以对步进电机进行控制，控制电机的速度可以通过改变输入脉冲的频率来改变步进电机旋转的速度，若要控制步进电机的正转与反转的变换可以通过改变 PMM8713 芯片的 4 号管脚的状态来控制步进电机的转向，而步进电机的启动停止是通过 PMM8713 芯片的 3 号管脚来控制的，3 号引角的脉冲消失则电动机停止转动，通过这些的控制方式的选择，可以很好的控制步进电动机。

PMM8713 是控制功能很强的步进电动机专用芯片。若将它们与单片机结合，将构

成功能更强的控制系统，可以更好的发挥步进电动机的功能。



## 六 直角坐标机器人的效果分析及技术评价

### 6.1 直角坐标机器人的效果分析

#### 6.1.1 直角坐标机器人与人工操作的比较

直角坐标机器人的使用效果的比较，通过下表得到，

效果方面	人工生产	采用机器人
适应生产方式	多品种、小批量	多品种、大中批量
劳动生产率	生产效率低、质量差	生产效率、产品有大幅提高
人员工作的变化	人置于生产环境中	把人从各种生产环境中解放出来
劳动条件的变化	体力劳动	脑力劳动

表 6-1 机器人使用效果分析对比表

#### 6.1.2 采用机器人工作带来的问题

- (1) 操作人员对程序不熟悉，需要一个培训过程。
- (2) 对机器人运动过程中可能出现的故障及其带来的危险性要有正确的认识，必须在软硬件方面采取安全措施。
- (3) 由手工工作的人转变成机器人的操作人员和维护人员，存在一个人员调配与裁减的问题。

### 6.2 直角坐标机器人结构的技术评价

#### 6.2.1 整体结构技术评价

##### (1) 动作的复杂程度

直角坐标机器人为三自由度，运动轨迹为直线，比较容易控制。

##### (2) 动作速度

直角坐标机器人三个自由度的最高速度均为 0.5m/s，在同类产品中属于中速。

##### (3) 抓取质量

机械手的抓取质量为  $1\sim 3\text{kg}$ ，在同类产品中属于轻载。

(4) 机器本身所占的空间与工作空间的比较

机器人本体所占的空间为  $1.422\times 0.948\times 1.78\text{m}^3$ ，其工作空间为  $0.8\times 0.6\times 0.3\text{m}^3$ 。

机器本身所占空间与工作空间之比较大，这主要是由于采用了单边驱动方式。

(5) 对温度、振动等环境的适应性

由于采用了电驱动的方式，以上因素对机器影响较小。

### 6.2.2 零件的技术分析

(1) 部分零部件可以成组加工。由于已进行模块化设计其中部分零件的结构相同，可以成组加工。如：电机连接板、轴端盖等。

(2) 部分零件加工工序相同。由于一些结构相似，只是尺寸上的差异，所以加工工序相同。

(3) 零件所规定的尺寸公差、形位公差及表面粗糙度等都是参考相关标准进行选择的。

(4) 零件工艺的选择。在设计过程中一般是考虑可以应用的几种加工方法，选择其中的一种，进行结构设计。下面举导轨支架为例进行说明：

表 6-2 加工方法对比表

加工方法	优点	缺点
先铸毛坯	精度高，成本低	只用于大批量生产
焊接加工	易加工，成本低	精度较低
用方形毛坯直接加工	精度最高	难加工，成本高

通过上述的比较，选择焊接加工的方法。

## 结束语

通过前面六章的介绍，读者可以很清楚的了解直角坐标机器人的设计过程。概括起来是，从设备的用途出发去思考设备的结构。再利用学过的机械知识进行设计。在设计的过程中，由于对机器人产品了解太少，遇到了好很多困难，但在老师的指导下经过了三个多月的努力，终于完成了设计任务，别外在设计中还注意了创新的设计，并取得了比较好的效果。

虽然作为本科生的产品设计，很难直接投入到生产中，但就其设计过程和方法本身而言，有很强的锻炼价值，能够实现理论与实践相结合，为今后的设计工作打下基础。在设计的过程中，我几乎用到了所有专业课的相关知识，同时查阅了大量的资料，不仅深化了对所学知识的理解，也提高了主动学习、主动解决问题的能力。

由于是第一次进行整个产品的设计，在设计过程中曾走了不少弯路，通过老师的帮助和同学共同讨论，进行了一次又一次的修改，在修改过程中，使产品更趋于全理化、规范化。

## 致谢

毕业设计是大学的最后一门课程，整个学期都在进行毕业设计。在设计中不仅培养了理论与实践相结合的能力，而且这次毕业设计也是对大学的所有的课程的一个总结，通过设计，重新复习了理论知识，让我更好的掌握理论知识，也提高了查阅资料的能力，进一步熟悉了设计过程。同时认识到自己的不足，须要进一步的学习，

毕业设计能够顺利完成，首先，我特别感谢设计指导老师高旭老师，在这个设计过程中每当遇到困难时，无论是打电话还是当面询问，老师总是耐心的讲解，通过老师指导解开了许多疑惑。其次，感谢每一位教过我的老师，是你们认真的教导，才让我掌握这么多专业知识，是你们的辛勤教导才使我能够把专业知识运用到毕业设计中，你们用辛勤的汗水毫不吝啬的把所有知识传授给我们，心中的感谢是无法用语言表达出来的。此外，感谢在设计中帮助过我的同学的朋友们，没有你们的帮助，我可能会多走很多弯路。你们总会在我疏忽的地方及时的提醒我，谢谢你们给我的帮助。

总之在这次毕业设计中，对老师、同学、朋友的帮助，在此，表示衷心的感谢，谢谢你们。

## 参考文献

- [1] (美) 克来格 (Craig, J.J). 机器人学导论[M]. 机械工业出版社. 2006.6
- [2] 林尚扬. 焊接机器人及应用[M]. 北京. 机械工业出版社. 2000
- [3] 杜祥瑛主编. 工业机器人及其应用[M]. 北京工业出版社. 1986
- [4] 机械设计手册[M].带传动和链传动/《机械设计手册》编委会.北京.机械工业出版社. 2007.2
- [5] 杨黎明. 机电一体化系统设计手册[M]. 国防工业出版社. 1997.1
- [6] 刘杰.赵春雨.宋伟. 机电一体化技术基础与产品设计[M]. 冶金工业出版社. 2003.11
- [7] 机械设计手册[M].单行本.机架箱体及导轨/《机械设计手册》编委会.北京.机械工业出版社. 2007.7
- [8] 濮良贵.纪名刚. 机械设计(第八版) [M]. 北京. 西北高等教育出版社. 2006.5
- [9] 机械设计手册[M].滚动轴承/《机械设计手册》编委会.北京.机械工业出版社. 2007.7
- [10] 徐灏. 机械设计手册第三卷[M]. 机械工业出版社.1991.9
- [11] 刘鸿文. 材料力学 I [M]. 北京. 高等教育出版社. 2004.1
- [12] 王永章. 数控技术[M]. 北京. 高等教育出版社. 2001.12
- [13] 周希章. 如何正确选用电动机[M]. 北京. 机械工业出版社. 2004.1