



视频讲解

本章主要从机器人的机械系统(运动机构、底盘设计、机械臂设计等)、电气系统(电气元件、传感器、电路设计)、控制系统(控制方案选择、控制算法)、软件系统4方面使读者了解机器人的整体系统组成。从机器人的软硬件两方面出发,讲述了机器人各大硬件部件及其材料的选取原则,介绍了软件系统方案的选取过程,为第4章介绍智能搬运机器人系统设计进行了铺垫。

3.1 行走机构简介

行走机构是行走式移动机器人的重要执行部件,它由行走驱动装置、传动机构、位置检测元件、传感器、电缆及管路等组成。行走机构一方面支承机器人的机身、臂部和手部,因而必须具有足够的刚度和稳定性;另一方面还需根据作业任务的要求,实现机器人在更广阔空间内的运动。配置这些驱动装置、传动机构、检测元件等使其发挥应有功能的过程称为移动系统行走机构设计。不同移动机器人的用途、工作环境、整体结构都不尽相同,为了达到让机器人平稳而准确地运动这一目的,必须选择一种合适的行走机构。目前常用的行走机构有4种:足式行走机构、履带式行走机构、轮式行走机构、复合机构(前3种机构的综合)。

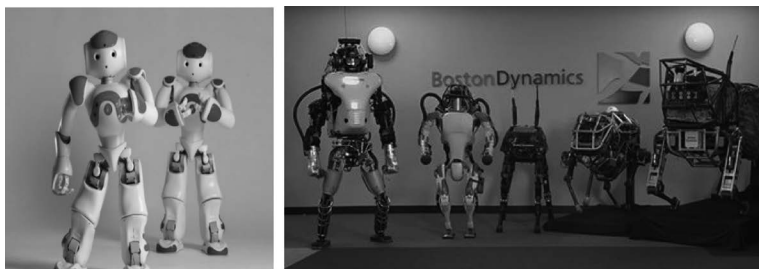
3.1.1 足式行走机构

足式行走结构即所谓的步行机器人,其步行运动方式模仿人类或动物的行走机理,用腿脚走路。它的立足点是离散的点,故不仅能在平地上行走,而且在崎岖路面上也具有有良好的适应能力,甚至可以跨越障碍、上下台阶,对环境的适应性强,智能程度相对较高,具有轮式机器人无法达到的机动性,具有独特的优越性能。

对设计和制作者来说,步行机器人的研究极具挑战性,其主要难点在于各个腿关节之间的协调控制、机身姿态控制、转向机构和转向控制、动力的有效传递和行走机构机理。步行机器人的种类很多,一般可分为两足机器人和多足机器人,如图3-1所示。一般将具有两腿机构的移动机器人叫作两足步行机器人,这种机器人基本上模仿人的下肢机构形态而制成。三足以上的足式机器人称为多足机器人,主要研究模仿四足和六足动物的各种步态,其具有复杂的步态规划。

步行机器人的机构复杂,由于其运动学及动力学模型复杂、控制难度较大。从移动的范

围来讲,车轮形及履带形的移动机构无论多么复杂,都只能在一个方向移动,虽然能够应付一定的坡度和凹凸表面,但是车体与移动机构始终保持着固定的位置关系。步行机器人的移动有着很大的不同,它可以在保持身体姿态不变的前提下,既能前后左右移动,又能沿着楼梯拾级而上,从这一点来看,步行机器人的移动是三维空间移动。另外,要控制它的步行和不倾倒有很大的难度,目前实现上述功能的机器人很少。正因如此,步行移动方式在机构和控制上是最复杂的,技术上还不成熟,不适用于对灵活性和可靠性要求较高的场合。



(a) 法国的nao

(b) 美国波士顿动力机器人

图 3-1 步行机器人

3.1.2 履带式行走机构

为了提高行走机构对于松软地面和崎岖地面的适应能力,履带式行走机构被广泛采用。履带方式又叫作循环轨道方式,其最大的特征是将圆环状的循环轨道履带卷绕在若干车轮外,车轮不直接与路面接触,可以缓冲路面状态,因此可以在各种路面上行走。

机器人采用履带行走方式有以下优点:

- (1) 由于冲角的作用,可以登上较高的台阶。
- (2) 具有较强的驱动力,适合在阶梯上移动。
- (3) 可进行原地自转,适合在狭窄的屋内移动。
- (4) 重心低,稳定性强。

履带式行走机构广泛用在各类建筑机械及军用车辆上(如图 3-2 所示)。履带式行走机构的不足之处是结构复杂,质量大,转弯不如轮式行走机构灵活。在需要改变方向时,要将某一侧的履带驱动机构减速或制动来实现转弯,或者反向驱动实现车体的原地自转。这会使履带与路面产生相对横向滑动,不但加大了机器人车体的能耗和履带磨损,还有可能损坏路面。



图 3-2 履带式行走机构(irobot)

3.1.3 轮式行走机构

轮式行走机构(如图 3-3 和图 3-4 所示)由滚动代替滑动摩擦,其主要特点是效率高,适合在平坦的路面上移动、定位精确,而且重量较轻、结构简单。



图 3-3 Blueover 机器人和 Robby 机器人



图 3-4 火星机器人

绝大多数轮式行走机构都是非完整运动约束驱动系统。轮式移动方式的分类有很多种,按照其轮子的数目划分为三轮、四轮、五轮机器人。目前机器人中最常用的是三轮或四轮移动方式,在某些特殊应用情况下也有用五轮以上的机器人,但这种机器人结构和控制都很复杂。以下分别介绍常用的三轮及四轮轮式行走机构。

1) 三轮移动方式

典型的三轮移动机器人通常采用一个中心前轮和两个后轮的布置方式,本体配置结构简单,但稳定性稍差,遇到冲撞或地面不平时容易倾倒。在这种移动方式下,应该将各种元器件尽量放在机器人的下层,确保机器人的重心处于比较低的位置,以弥补此结构本身存在的稳定性差的问题。

三轮移动方式包括共轴驱动行走机构和全方位移动机构两种方式。

(1) 共轴驱动行走机构——最常见的非完整运动约束机器人系统是共轴驱动系统,其结构如图 3-5 所示。它们的最基本形式是用两个电机分别驱动左后、右后两个主动轮,两个主动轮共用一个轴,与机器人从动轮组成的前轮系统共同形成对本体的支撑行走结构。如图 3-5 所示是共轴驱动行走机构设计实例,此设计来自中国矿业大学(北京)2009 年 Robocup 暨中国机器人大赛中勘探组的参赛机器人,其左后、右后两个主动轮,保证行进中机器人的平衡及便于转弯,在机器人底盘的前部安装有从动轮的前轮系统,这样的机构使机器人能够实现以自身为圆心的旋转运动。



图 3-5 三轮移动机器人

(2) 全方位移动机构——全方位移动机构采用一种比较特殊的轮,3 个万向轮位于等边三角形的 3 个顶点处,3 个主轮之间两两成 60° 夹角,轴线与中线重合。之所以选择 3 个万向轮的正三角形组合,是因为正三角形组合方式有它独特的优势。因为三点确定一平面,无论怎样,3 个点总是在同一平面上,无论什么情况,3 个万向轮都必然着地,不会出现某个轮悬空的情况,这是 4 个轮或更多轮的行走机构无法做到的。在三轮移动机器人系统中,每个轮都有单独的驱动电机。这样,通过控制电路控制这 3 个电机,从而实现全方位的行走。

2006 年的手动移动机器人设计中采用了这种移动方式,行走轮采用进口轮,名为 trans-wheel。关于 trans-wheel 轮的详细介绍,读者可以到相关网站查找。这种行走系统借助了 trans-wheel 轮子的全向性,依靠 3 个驱动电机的差速,可以实现任何方向的移动。其机械结构简单,稳定性高,用电子调速的方式可以任意半径和零半径转弯。

2) 四轮移动方式

(1) 四轮移动方式一。

这是典型的汽车移动机构。机器人采取另一种转向方式,通过前部转向轮的朝向确定行走方向。这种方式非常适合于户外应用,特别是在崎岖地形,然而这样的机器人比传统的差速驱动方式的机器人制作起来更复杂,却可以得到更好的转向精度和更大的牵引力,这种技术叫作阿克曼转向(Ackerman Steering)。因为这种转向方式可以使轮胎产生更大的牵引力,具有更小的摩擦损耗,所以大部分汽车都采用这种转向方式。但目前这种转向技术更适用于大型车辆,在机器人上的应用并不多。

(2) 四轮移动方式二。

这是移动机器人领域常见的一种四轮移动方式,如图 3-6 所示。前轮是两个万向轮,后轮是两个独立的驱动轮。这种结构的优点是遇到冲撞或地面不平时稳定性好;缺点是机器人在行走过程中只有 3 个轮着地,因此在行走时必须保证两个驱动轮着地,否则会影响机器人行走的定位精度。



图 3-6 四轮移动机器人

(3) 四轮移动方式三。

四轮移动方式的另一种典型机构是前后轮为万向轮,左右两轮为驱动轮,其自转重心在车体中间,便于在狭窄场所改变行走方向。但前后辅助的万向轮有时不能同时着地支撑,在

高速启动和制动时会产生俯仰和前冲,或者在加速度很大时不走直线,所以应尽量将车体重心配置在两个驱动轮连线的附近,以减少惯性的影响。为了提高机器人行走时的稳定性,机器人的底盘改进了结构,把机器人底盘降低至距离地面 15mm,并适当增加前万向轮与中间驱动轮的距离。综合三轮式和四轮式车体的优缺点,把两个驱动轮放在中间位置,两个从动轮前后各一个。不论采用何种布置方式,在小车运动过程中的某一瞬间只能是三点支撑。通过调节前后两个从动轮的高度,使前从动轮和两个驱动轮着地,机器人在受到撞击或转弯时,后从动轮可以起到辅助支撑的作用,以增加机器人的稳定性。

(4) 四轮移动方式四。

“全向轮”是由瑞典人 Bengt Ilon 在 1973 年设计的,人们称其为“瑞典轮”。其滚轮和主轮之间的布置角度,通常取 90° 和 45° 。主轮的主轴连接动力,周围的滚轮是被动的。主轮主动旋转,滚轮不仅可向前向后,而是可沿许多可能的轨迹以很小的摩擦按运动学原理移动。滚轮与主轮正交平面没有滑动约束,使得整轮可沿任何方向运动,是全向的,故称“全向轮”。 45° 轮系通常也被称为万向轮。如图 3-7 所示为国内的一款万向轮移动底盘。



图 3-7 万向轮移动底盘

全向运动:运动速度的大小与方向是通过独立控制每个电机的运动进行合成。

优点:水平面上的运动与绕自身 z 轴的旋转运动线性无关,可以独立控制。

在轮式机器人的选型过程中可根据具体的课题来确定选择几轮更适合。具体项目和任务是指导选择机器人底盘机构的重要考虑因素。选择合适的轮数、设计合适的底盘机构,可以更好地完成实验任务。轮式机器人是最为普遍和使用方便的一类机器人,这里为机器人设计者提供一定的指导。

3.2 机器人底盘结构设计

机器人的底盘是机器人最为重要的一个单元。作为移动和支撑的最核心部分,底盘结构设计需考虑材料学、机械原理、机构学等方面,以使底盘具有较强的适应性和稳定性。

3.2.1 底盘材料及结构选择

常用的机器人底盘材料有两种:一种是铝合金,另一种是不锈钢。铝合金重量轻、制作加工较为简单;不锈钢虽然加工较困难,但强度高,不易变形,目前多选用不锈钢材料。底盘结构按加工工艺可划分为零件连接底盘和焊接底盘。二者最大的区别是:底盘是否需要角铝连接,相对于焊接一体的焊接底盘,角铝连接底盘的零件数量要多得多,失效的概率也要大得多。从重量角度来讲,铝材虽然体积、重量较小,但是强度不如不锈钢,因此,其截面面积相对较大,加之其附加的连接角铝和螺栓,其重量要远远大于不锈钢焊接底盘。

1) 角铝连接底盘

采用方管铝与角铝搭建的底盘具有焊接底盘不具备的优点。首先,由于铝材较软,可以用切铝机进行切割,制作比较简单;其次,由于可以自己制作,而且效率高,因此制作周期很短;最后,在机器人的调试运行阶段,当底盘出现问题的时候,可以制作方管和角铝来进行

维修,维修周期要短很多。

但是采用方管铝与角铝搭建的底盘也有无法克服的缺点。相对于一体的焊接底盘,角铝连接底盘的零件数量要大得多,所以,即使从重量角度讲铝材虽然比较轻,但强度不如不锈钢;另外,其截面积相对较大,加之其附加的连接角铝和螺栓,其总重量要远远大于不锈钢焊接底盘;采用这种底盘加工工艺,在操作角铝与方管时会产生误差,这些误差在最后装配时会有累积效应,从而导致装配精度低且装配困难,整个方形底盘往往会出现变形、平面度低等现象;在调试过程中,机器人高速前进,在运行过程中难免会产生振动,从而使螺栓、螺母松动,因此,这种加工工艺失效概率也大得多。

2) 焊接底盘

与角铝连接底盘相比,焊接底盘具有焊接精度较高、重量较轻的优点。机器人采用焊接底盘时,可以将传感器、电机等器件放在底盘之上,使机器人的重心放低,避免机器人在运行过程中出现倾覆现象。但是焊接底盘的结构相对固定,因此当底盘有磨损或损坏的时候,维修周期会很长。由于实际应用中很少出现底盘损坏的情况,考虑到采用角铝连接底盘存在比较多的问题,所以一般机器人的底盘设计采用不锈钢焊接工艺。

3.2.2 基于轮式机器人的底盘结构分析

四轮驱动机器人(如图 3-8 所示)的优点是具有很好的走直线功能,能够提供更大的驱动力;缺点是由于制造安装等原因,4 个轮子很难同时着地,易出现打滑等问题,转弯性能不好。

两轮驱动机器人(如图 3-9 所示)按驱动轮的位置可分为中间轮驱动、前轮驱动和后轮驱动,具体介绍如下。

(1) 中间轮驱动驱动轮在中间,其转弯半径为零,适用于重心靠中的机器人。

(2) 前轮驱动驱动轮在前端,其优点是转动中心靠前,前端用于抓取物体的机构调整的幅度更小,更容易对准。缺点也是显而易见的:一是电机启动时由于惯性整车会后仰,驱动轮上的正压力减小,地面提供的摩擦力也减小,所以启动时打滑明显,启动加速度减小,从而拖延时间;二是由于电机等配件较重,使整车的重心前移,若要抓取小型物体,机器人更容易向前倾倒。所以,驱动轮在前端特别适合重心靠后的机器人。



图 3-8 典型的四轮驱动机器人



图 3-9 两轮驱动机器人模型

(3) 后轮驱动驱动轮在后端,其优点是能够很好解决启动时加速度不够的问题,缺点则是整车转动中心靠后,前端抓取物体机构的转动半径加长,所以机器人左右微调的幅度扩大,不利于调整对准,在冲撞中有后倒的可能性,适合重心靠后的机器人。

当设计机器人的底盘时,保证机器人满载、启动和急停时都不会倒是最基本的要求。在驱动轮前置或者后置的方案中,重心距离驱动轮轴线不应该超过驱动轮和从动轮距离的 $1/3$, 否则提供的驱动力不足,导致机器人启动慢,变向慢,甚至驱动轮打滑。



视频讲解

3.3 电机选型

电机(motor)是把电能转换成机械能的一种设备。它利用通电线圈(也就是定子绕组)产生旋转磁场并作用于转子(如鼠笼式闭合铝框)形成磁电力旋转转矩。电机按使用电源不同分为直流电机和交流电机,电力系统中的电机大部分是交流电机,可以是同步电机或者是异步电机(电机定子磁场转速与转子旋转转速不保持同步速)。电机主要由定子与转子组成,通电导线在磁场中受力运动的方向与电流方向和磁感线(磁场方向)方向有关。电机工作原理是磁场对电流受力的作用,使电机转动。

(1) 按工作电源分类。根据电机工作电源的不同,可分为直流电机和交流电机。其中交流电机还分为单相电机和三相电机。

(2) 按结构及工作原理分类。电机按结构及工作原理可分为直流电机、异步电机和同步电机。同步电机还可分为永磁同步电机、磁阻同步电机和磁滞同步电机。异步电机可分为感应电机和交流换向器电机。感应电机又分为三相异步电机、单相异步电机和罩极异步电机等。交流换向器电机又分为单相串励电机、交直流两用电机和排斥电机。

(3) 按起动与运行方式分类。电机按起动与运行方式可分为电容起动式单相异步电机、电容运转式单相异步电机、电容起动运转式单相异步电机和分相式单相异步电机。

(4) 按用途分类。电机按用途可分为驱动用电机和控制用电机。驱动用电机又分为电动工具(包括钻孔、抛光、磨光、开槽、切割、扩孔等工具)用电机、家电(包括洗衣机、电风扇、电冰箱、空调器、录音机、录像机、影碟机、吸尘器、照相机、电吹风、电动剃须刀等)用电机及其他通用小型机械设备(包括各种小型机床、小型机械、医疗器械、电子仪器等)用电机。控制用电机又分为步进电机和伺服电机等。

(5) 按转子的结构分类:电机按转子的结构可分为笼型感应电机(旧标准称为鼠笼型异步电机)和绕线转子感应电机(旧标准称为绕线型异步电机)。

(6) 按运转速度分类:电机按运转速度可分为高速电机、低速电机、恒速电机、调速电机。

在机器人系统中电机类型一般分为如下几类:

- (1) 步进电机;
- (2) 直流减速电机(如伺服电机、舵机);
- (3) 直流有刷电机、直流无刷电机;
- (4) 特种电机(如超声波电机等)。

3.3.1 步进电机

1. 步进电机的工作原理

步进电机(steping motor,如图 3-10 所示)是将电脉冲信号转变为角位移或线位移的开环控制电机,是现代数字程序控制系统中的主要执行元件,应用极为广泛。步进电机多用

于数字式计算机的外部设备,以及打印机、绘图机和磁盘等装置。在非超载的情况下,电机的转速、停止的位置只取决于脉冲信号的频率和脉冲数,而不受负载变化的影响,当步进驱动器接收到一个脉冲信号时,它就驱动步进电机按设定的方向转动一个固定的角度,称为“步距角”,它的旋转是以固定的角度一步一步运行的。可以通过控制脉冲个数来控制角位移量,从而达到准确定位的目的;同时可以通过控制脉冲频率来控制电机转动的速度和加速度,从而达到调速的目的。

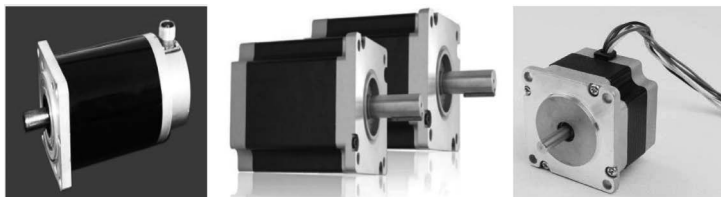


图 3-10 步进电机

步进电机与伺服电机的不同体现在如下 7 方面:

- (1) 控制精度——伺服电机控制精度可以根据编码器设置,精度更高;
- (2) 低频特性——步进电机低频容易振动,伺服电机不会;
- (3) 矩频特性——步进电机随转速提高力矩变小,所以其最高工作转速一般小于 1000r/min,伺服电机在额定转速(一般为 3000r/min)内都能输出额定力矩,在额定转速以上为恒功率输出,最高转速可达 5000r/min;
- (4) 过载能力——步进电机不能过载,伺服电机最大力矩可过载 3 倍;
- (5) 运行性能——步进电机为开环控制,伺服电机时闭环控制;
- (6) 速度响应——步进电机起动时间 0.15~0.5s,伺服电机起动时间 0.05~0.1s,最快可 0.01s 达到额定 3000r/min;
- (7) 效率指标——步进电机效率约为 60%,伺服电机约为 80%。

在实际使用中,因为伺服电机的价格高很多,所以同步电机应用更广泛,特别是在定位精度要求不是很高的同步带传动、平带输送机等场合经常使用步进电机。

1) 步进电机的优缺点

(1) 过载性好。其转速不受负载大小的影响,不像普通电机,当负载加大时就会出现速度下降的情况,步进电机使用时对速度和位置都有严格要求。

(2) 控制简单。步进电机是以“步”为单位旋转的,数字特征比较明显。

(3) 结构简单、使用维修方便、制造成本低。传统的机械速度和位置控制结构比较复杂,调整困难,步进电机使得整机的结构变得简单和紧凑。在步进电机的尾端安装测速电机,通过测速电机将转速转换成电压,并传递到输入端的比较器环节,作为反馈信号反馈给控制器,来达到控制电机转速的目的。步进电机没有累积误差,适用于速度和精度要求不高的地方。

步进电机的缺点是效率较低;发热大;有时会“失步”,同时控制不当会产生共振,并且难以获得较高的转速。

2) 步进电机的应用

步进电机主要用于数字控制系统中,其精度高,运行可靠。例如,采用位置检测和速度

反馈,亦可实现闭环控制。目前,步进电机已广泛应用于数字控制系统中,如数模转换装置、数控机床、计算机外围设备、自动记录仪、钟表等之中;在工业自动化生产线、印刷设备等中亦有应用。

2. 步进电机选型

选择步进电机时,首先要保证步进电机的输出功率大于负载所需的功率。在选用功率步进电机时,首先要计算机械系统的负载转矩,电机的矩频特性能满足机械负载要求并有一定的余量保证其运行可靠。在实际工作过程中,各种频率下的负载力矩必须在矩频特性曲线的范围内。一般来说,最大静力矩 $M_{\max}$ 大的电机,负载力矩大。

选择步进电机时,应使步距角和机械系统匹配,这样可以得到系统所需的脉冲当量。在机械传动过程中,为了获得更小的脉冲当量,一是可以改变丝杆的导程;二是可以通过改变步进电机的细分驱动来完成。但细分只能改变其分辨率,不能改变其精度,而精度是由电机的固有特性所决定的。

选择功率步进电机时,应当估算机械负载的负载惯量和机床要求的启动频率,使之与步进电机的惯性频率特性相匹配且有一定的余量,使之最高速连续工作频率能满足机床快速移动的需要。选择步进电机需要进行以下计算。

(1) 计算齿轮的减速比,根据所要求脉冲当量,齿轮减速比 i 计算如下:

$$i = (\varphi \cdot S) / (360^\circ \Delta)$$

式中, φ 为步进电机的步距角($^\circ$ /脉冲);

S 为丝杆螺距(mm);

Δ 步进电机的步距(mm/脉冲)。

(2) 计算工作台、丝杆以及齿轮折算至电机轴上的惯量 J_t 。

$$J_t = J_1 + (1/i \cdot 2) [(J_2 + J_s) + W/g(s/2\pi)^2]$$

式中, J_t 为折算至电机轴上的惯量;

J_1 、 J_2 为齿轮惯量($\text{kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$);

J_s 为丝杆惯量($\text{kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$);

W 为工作台重量(N);

S 为丝杆螺距(cm)。

(3) 计算电机输出的总力矩 M 。

$$M = M_a + M_t + M_f$$

$$M_a = (J_m + J_t) \cdot n/T \times 1.02 \times 10^{-2}$$

式中, M_a 为电机起动加速力矩($\text{N} \cdot \text{m}$);

J_m 、 J_t 为电机自身惯量与负载惯量($\text{kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^2$);

n 为电机所需达到的转速(r/min);

T 为电机升速时间(s)。

$$M_f = (u \cdot W \cdot s) / (2\pi\eta i) \times 10^{-2} \quad (3-1)$$

式中, M_f 为导轨摩擦折算至电机的转矩($\text{N} \cdot \text{m}$);

U 为摩擦系数;

η 为传递效率。

$$M_t = (P_t \cdot s) / (2\pi\eta i) \times 10^{-2} \quad (3-2)$$

式中, M_t 为切削力折算至电机力矩($N \cdot m$);

P_t 为最大切削力(N)。

(4) 负载起动频率估算。数控系统控制电机的起动频率与负载转矩和惯量有很大关系,其估算公式为

$$f_q = f_{q0} \{ [1 - (M_f + M_t) / M_l] \div (1 + J_t / J_m) \}^{1/2}$$

式中, f_q 为带载起动频率(Hz);

f_{q0} 为空载起动频率(Hz);

M_l 为起动频率下由矩频特性决定的电机输出力矩($N \cdot m$)。

若负载参数无法精确确定,则可按 $f_q = 1/2 f_{q0}$ 进行估算。

(5) 运行的最高频率与升速时间的计算。由于电机的输出力矩随着频率的升高而下降,因此在最高频率时,由矩频特性的输出力矩应能驱动负载,并留有足够的余量。

(6) 负载力矩和最大静力矩 M_{max} 。负载力矩可按式(3-1)和式(3-2)计算,电机在最大进给速度下,由矩频特性决定的电机输出力矩要大于 M_f 与 M_t 之和,并留有余量。一般来说, M_f 与 M_t 之和应小于 $(0.2 \sim 0.4) M_{max}$ 。

3. 实际步进电机标牌信息及选型

1) 实际步进电机型号

步进电机型号由4部分组成,分别代表机座号、电机类型(BYF代表混合式,BC代表反应式)、相数、电机转子齿数。

(1) 机座号:又叫电机外径,包括28、42、57、86、110、130型号。28、42、57、86、110、130步进电机是指混合式步进电机安装法兰尺寸大小,单位是mm,代表步进电机的法兰尺寸分别是28mm×28mm、42mm×42mm、56.4mm×56.4mm,以这种方式命名的是一种尺寸类型,市面上常见的混合式步进电机的尺寸品种有14、20、25、28、35、36、39、42、50、57、60、86、110、130、150步进电机等。

(2) 电机类型。

① 反应式:定子上有绕组、转子由软磁材料组成。结构简单、成本低、步距角小,可达 1.2° ,但动态性能差、效率低、发热大,可靠性难保证。

② 永磁式:永磁式步进电机的转子用永磁材料制成,转子的极数与定子的极数相同。其特点是动态性能好、输出力矩大,但这种电机精度差,步距角大(一般为 7.5° 或 15°)。

③ 混合式:混合式步进电机综合了反应式和永磁式的优点,其定子上有多相绕组、转子上采用永磁材料,转子和定子上均有多个小齿以提高步距精度。其特点是输出力矩大、动态性能好,步距角小,但结构复杂、成本相对较高。

(3) 相数:产生不同对极N、S磁场的激磁线圈对数。常用 m 表示。

(4) 转子齿数:转子齿数是指定转子铁芯上转子小齿的数量。转子齿数的不同会改变单相各个线圈之间的互补性;改变线圈磁链的极性,对单相线圈磁链的谐波成分造成影响,进而对电机的谐波特性造成影响,还影响电机的功率密度。

2) 实际步进电机选型

步进电机有步距角(涉及相数)、静转矩、电流及电压四大要素。三大要素确定后,步进电机的型号便可确定。

(1) 步距角的选择: 电机的步距角取决于负载精度的要求, 将负载的最小分辨率(当量)换算到电机轴上, 每个当量电机应走多少角度(包括减速)。电机的步距角应小于或等于此角度。

(2) 静力矩的选择: 静力矩选择的依据是电机工作的负载, 而负载可分为惯性负载和摩擦负载两种。单一的惯性负载和单一的摩擦负载是不存在的。直接起动时(一般由低速)两种负载均要考虑, 加速起动时主要考虑惯性负载, 恒速运行进只需要考虑摩擦负载。

(3) 电流的选择: 静力矩一样的电机, 由于电流参数不同, 其运行特性差别很大, 可依矩频特性曲线图判断电机的电流。

(4) 电压的选择: 根据所使用环境选择交流还是直流, 若选择直流则需要选择电压大小。

3) 选型举例分析说明

步进电机的关键参数是力矩, 首先要选择合适力矩的电机。比如负载需要 $1\text{N} \cdot \text{m}$ 的转矩, 就要先选择一个 $1\text{N} \cdot \text{m}$ 的电机, 才有可能带得起负载。然后要选择使用条件: 其一是电压, 可以选直流 12V 、 24V 、 48V 、 72V , 也可选交流 110V 、 220V 等。电压的选择对电机的性能影响是: 电压越高, 步进电机的性能越好, 特别是电机的高速性能越好。另外一个电流: 同样力矩的电机, 它标定的是保持转矩, 也叫静转矩, 指的是电机不转时, 它锁定的转矩, 一定程度上也反映了电机的能力。可以发现, 即使是同样保持力矩的电机, 它的电参数却有很多种, 例如, $1\text{N} \cdot \text{m}$ 的电机, 它的电阻值和电流值会有好多种选择。原因是, 这些不同电流的电机, 是考虑到客户的驱动器的不同能力和不同成本的要求而设计的: 电流小的, 它的驱动器元器件成本较低; 电流大的驱动器的各种元器件成本要高一些。当然电流选得小了, 虽然看上去电机的转矩也达到了, 但所付出的代价是: 这些小电流大转矩的电机, 它的电阻值和电感量都偏大, 导致电机的高速性能有所下降。这种情况主要用在客户对电机转速要求不高的情形下。

最后是驱动电路设计: 可简单地分为定电压驱动和恒流驱动。

(1) 定电压的驱动, 即所使用的电压指定成 24V 或 12V , 电机的电阻值一定要匹配, 通常电阻值要选几十欧的, 不然电流会太大, 烧掉驱动芯片, 除非选的芯片够大。

(2) 定电流的驱动, 通常是针对一些电阻较小的电机, 同时电流值会稍大一些, 例如有的是 1A 、 2A 、 3A 。电流再大的话, 就需要选一些通用的驱动器, 一般有 4A 、 6A 的, 只是成本稍高一些。

4. 步进电机的控制

步进电机的控制方式一般分为开环控制与闭环控制两种。其中开环控制步进电机最简单的控制方式就是开环控制系统, 在这样的控制方式下, 步进电机控制脉冲的输入并不依赖于转子的位置, 反而是按一个固定的规律发出其控制脉冲。步进电机仅依靠这一系列既定的脉冲而工作, 这种控制方式由于步进电机的独特性而比较适合于控制步进电机。

闭环控制是控制论的一个基本概念, 是指被控对象的输出以一定方式返回到作为控制的输入端, 并对输入端施加控制影响的一种控制关系。

在闭环控制的步进电机系统中, 可在具有给定精确度下跟踪和反馈时, 扩大工作速度范围; 也可在给定速度下提高跟踪和定位精度; 或可得到极限速度指标和极限精度指标。

步进电机的闭环控制方式大致分为两种。

(1) 使激磁磁通与电流的相位关系保持一致,使其产生能带动负载转矩的电磁转矩,这种控制电机电流的方式与无刷直流电机控制方式相同,称为无刷驱动方式或电流闭环控制方法。

(2) 电机电流保持一定,控制激磁磁通与电流相位角的方式,称为功率角闭环控制方法。功率角为转子磁极与定子激磁相(或认为是同步电机的定子旋转磁场轴线也可以)相互吸引所成的相位角。此功率角在低速时或低负载时较小,高速时或高负载时较大。闭环控制的原理如图 3-11 所示, $\bar{A}$ 相吸引转子磁极,其次, $\bar{B}$ 相激磁时的角度为 $\pi/2$,转子磁极位于 $\bar{A}$ 相前缘(图中转子的 S 极位于 A 相的左侧)时,使磁极 $\bar{B}$ 相开始激磁。

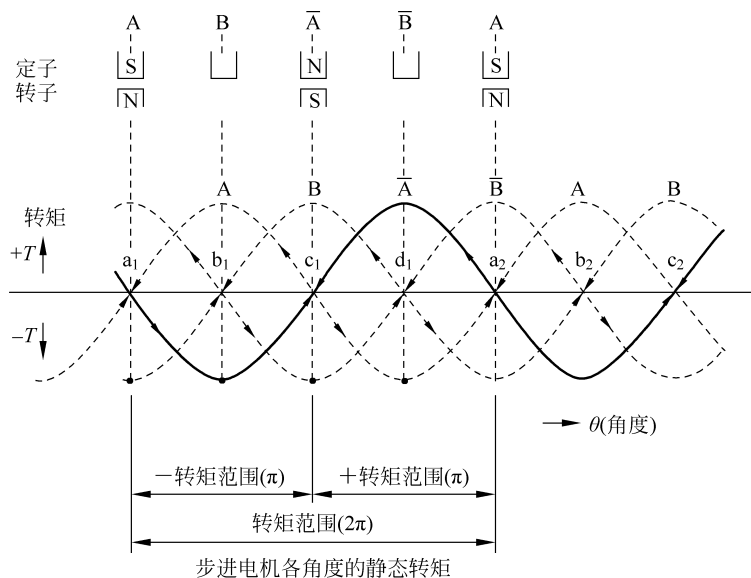


图 3-11 步进电机功率角闭环控制方法的原理

步进电机在高速运转时,受线圈电感的影响,使 A 相电流的关断时间延长,B 相电流上升时间也延长,因此,产生最大转矩加速的角度,其值随速度变快而变大。

闭环步进电机工作原理如图 3-12 所示。

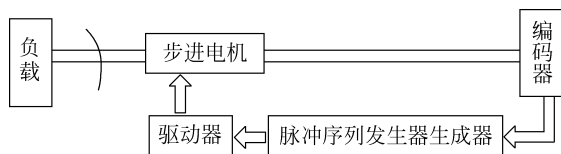


图 3-12 闭环步进电机控制原理

这种控制方式是直接或间接地检测出转子(或负载)的位置或速度,然后通过反馈和适当的处理,自动地给出步进电机的驱动脉冲序列,这个驱动脉冲序列是根据负载或转子的位置而随时间变化的控制方式,在精度要求很高的场合,结合微步驱动技术及微型计算机控制技术,可以实现很高的位置精度。

闭环步进电机的优势如下:

(1) 随着输出转矩的增加,二者的速度均以非线性形式下降,但是,闭环控制提高了矩频特性。

(2) 在闭环控制下,输出功能和转矩的曲线得以提高,原因是,在闭环下,电机励磁转换是以转子位置信息为基础的,电流值决定于电机负载,因此,即使在低速度范围内,电流也能够充分转换成转矩。

(3) 在闭环控制下,效率和转矩的曲线得以提高。

(4) 采用闭环控制,可得到比开环控制更高、更稳定的转速。

(5) 利用闭环控制,步进电机可自动地、有效地被加速和减速。

(6) 闭环控制相对开环控制在快速性方面提高的定量评价,可借助比较上述(4)中的某个相同路径间隔的时间得出。

$$\frac{T_{\text{开环}}}{T_{\text{闭环}}} = 0.625 \sqrt{N/n}$$

(7) 应用闭环驱动效率可提高 7.8 倍;输出功率可提高 3.3 倍;速度可提高 3.6 倍。闭环驱动的步进电机的性能在所有方面均优于开环驱动的步进电机。步进电机闭环驱动具有步进电机开环驱动和直流无刷伺服电机的优点。因此,在可靠性要求很高的位置控制系统中,闭环控制的步进电机将获得广泛应用。

步进电机开环与闭环有何区别?

(1) 开环控制是没有反馈的,只能按照输入执行。闭环控制是有反馈的,需要观测执行情况。

(2) 是否对当前控制起作用。开环控制一般是在瞬间就完成的控制活动,闭环控制一定会持续一定的时间,可以借此机会进行判断。

3.3.2 直流电机

作为机器人动力系统的主要执行单元,直流电源为机器人实现灵活运动提供动力来源。直流电机是将直流电能转换为机械能的转动装置。电机定子提供磁场,直流电源向转子的绕组提供电流,换向器使转子电流与磁场产生的转矩保持方向不变。根据是否配置有常用的电刷-换向器可以将直流电机分为两类,分别为有刷直流电机和无刷直流电机。

1. 直流电机的工作原理

直流电机是将直流电能转换为机械能的电机。直流电机内部固定有环状永磁体,电流通过转子上的线圈产生安培力,当转子上的线圈与磁场平行时,如果再继续转,那么受到的磁场方向将发生改变,因此此时转子末端的电刷与换片交替接触,线圈上的电流方向也随之改变,产生的洛伦兹力方向不变,所以电机能保持一个方向转动。因其具有良好的调速性能,从而在电力拖动中得到广泛应用。直流电机按励磁方式分为他励、并励、串励和复励 4 类。

下面介绍直流无刷电机(如图 3-13 所示)的控制原理。要让电机转动起来,控制部分就必须根据霍尔传感器感应到的电机转子所在位置,然后依照定子绕线决定开启(或关闭)换流器(Inverter)中功率晶体管的顺序,换流器中的 AH、BH、CH(这些称为上臂功率晶体管)及 AL、BL、CL(这些称为下臂功率晶体管)使电流依序流经电机线圈产生顺向(或逆向)旋转磁场,并与转子的磁铁相互作用,如此就能使电机顺时针/逆时针转动。当电机转子转动到霍尔传感器感应出另一组信号的位置时,控制部分又再开启下一组功率晶体管,如此循环,电机就可以按同一方向继续转动直到控制部分决定要电机转子停止,则关闭功率晶体管(或只开下臂功率晶体管);要电机转子反向时功率晶体管开启顺序相反。



图 3-13 直流无刷电机 maxon

基本上功率晶体管的开法可举例如下：AH、BL 一组→AH、CL 一组→BH、CL 一组→BH、AL 一组→CH、AL 一组→CH、BL 一组，但绝不能开成 AH、AL 或 BH、BL 或 CH、CL。此外，因为电子零件总有开关的响应时间，所以功率晶体管在关与开的交错时间要将零件的响应时间考虑进去，否则当上臂（或下臂）尚未完全关闭时，下臂（或上臂）就已开启，结果就造成上、下臂短路而使功率晶体管烧毁。

当电机转动起来，控制部分会再根据驱动器设定的速度及加/减速率所组成的命令（Command）与霍尔传感器信号变化的速度加以比对（或由软件运算）再来决定由下一组（AH、BL 或 AH、CL 或 BH、CL 或……）开关导通，以及导通时间长短。速度不够则加长，速度过头则减短，此部分工作就由 PWM 来完成。PWM 决定电机转速快或慢的方式，如何产生这样的 PWM 才是要达到较精准速度控制的核心。

高转速的速度控制必须考虑到系统的 CLOCK 分辨率是否能满足处理软件指令的时间要求，另外，对于霍尔传感器信号变化的资料存取方式也影响到处理器的效能与判定的正确性、实时性。至于低转速的速度控制尤其是低速起动，则因为回传的霍尔传感器信号变化变得更慢，获取信号方式、处理时机以及根据电机特性适当配置控制参数值就显得非常重要。如果速度回传改变以编码变化为参考，则信号分辨率增加以期得到更佳的控制。电机能够运转顺畅而且响应良好，PID 控制得恰当与否也无法忽视。之前提到直流无刷电机是闭环回路控制，因此回授信号就等于是告诉控制部分电机转速距离目标速度还差多少，这就是误差（Error）。有误差自然就要补偿，可采用方式有传统的工程控制如 PID 控制。但控制的状态及环境其实是复杂多变的，若要控制得坚固耐用则要考虑的因素恐怕不是传统的工程控制能完全掌握，所以模糊控制、专家系统及神经网络也将被纳入成为智能型 PID 控制的重要理论。

2. 电机的机械特性

电机的转速 n 随转矩 T 的变化而变化的特性称为机械特性，以 $n = f(T)$ 表示，它是选用电机的一个重要依据。各类电机都因自己的机械特性而适用于不同的场合。

1) 调速：从直流电机的电枢回路看，电源电压 U 与电机的反电动势 E_d 和电枢电流 I_d 在电枢回路电阻 R_d 上的电压降必须平衡。即

$$U = E_d + I_d R_d$$

反电动势又与电机的转速 n 和磁通 φ 有关，电枢电流又与机械转矩 M 和磁通 φ 有关。对于 z4 系列直流电机（如图 3-11 所示），有

$$E_d = C\varphi n$$

$$M = C\varphi I_d$$

式中， C 为常数。以上是未考虑铁芯饱和等因素时的理想关系，但对实际直流电机的分析有指导意义。由上可见，直流电机（如图 3-14 所示）有 3 种调速方法：调节励磁电流、调节电枢端电压和调节串入电枢回路的电阻。调节电枢回路串联电阻的办法比较简便，但能耗较大；

且在轻负载时,由于负载电流小,串联电阻上电压降小,故转速调节很不灵敏。调节电枢端电压并适当调节励磁电流,可以使直流电机在宽范围内平滑地调速。端电压加大使转速升高,励磁电流加大使转速降低,二者配合得当,可使电机在不同转速下运行。调速中应注意高速运行时,换向条件恶化,低速运行时冷却条件变坏,这些都会限制电机的功率。



图 3-14 直流电机

接近恒功率特性,低速时转矩大,故广泛用于电动车辆牵引。在电车中常用两台或两台以上既有串励又有并励的复励直流电机共同驱动。利用串、并联改接的方法使电机端电压成倍地变化(串联时电机端电压只有并联时的一半),从而可经济地获得更大的调速范围并减少起动时的电能消耗。

电机的“转矩”单位是 $\text{N} \cdot \text{m}$ (牛·米),计算公式是

$$T = 9550P/n$$

式中, P 是电机的额定(输出)功率,单位是千瓦(kW),分母是额定转速 n ,单位是转每分(r/min), P 和 n 可从电机铭牌中直接查到。

2) 并励直流电机转速计算公式是

$$n = [U_s / C_e \Phi] - [(I_s - I_r) * R_s / C_e \Phi]$$

式中, n 为电机转速;

U_s 为动机外加直流电压;

$C_e \Phi$ 为电机常数;

I_s 为供给电机的总电流;

I_r 为电机并励磁电流;

R_s 为电机电枢绕组直流电阻。

交流异步电机转速公式是

$$\text{理想转速} = \text{频率} \times 60 / \text{极对数}$$

$$\text{实际转速} = \text{理想转速} \times (1 - \text{转差率})$$

比如,交流电频率为 50Hz,极对数为 2,转差率为 0.04,那么

$$\text{理想转速} = 50 \times 60 / 2 = 1500(\text{r/min})$$

$$\text{实际转速} = 1500 \times (1 - 0.04) = 1500 \times 0.96 = 1440(\text{r/min})$$

$n = 60f/p(1-s)$ 是异步转速的公式(f 为频率; p 为极对数; s 为转差率); $n = 60f/p$ 是同步转速的公式。

3. 直流减速电机的特性

(1) 电机转速:与电压成正比。

直流电机转速

$$n = (U - IR) / C\varphi$$

式中, U 为转子(电枢)的外加电压值(V);

I 为转子中的电流(A);

R 为转子中的电阻(电枢电阻)(Ω);

C 为对于已经做好的电机,这是一个常数;

φ 为主极磁通。

从上面的式子可以看出,转子转速与主极磁通有很大的关系,所以不能简单地说“电压与转速成正比”。若磁通是恒定的,则电机转子的转速与电压近似成正比(IR 比 U 要小很多,近似计算时可以忽略)。

(2) 电机转向:与接入电压的极性相关。

可以采用以下两种方法来改变直流电机的转向。

① 改变电枢两端电压极性,以改变电枢电流的方向。即保持励磁绕组的端电压极性不变,通过改变电枢绕组端电压的极性使电机反转。

② 改变励磁绕组的极性,以改变主磁场的方向。即保持电枢绕组端电压的极性不变,通过改变励磁绕组端电压的极性使电机转向。当两者的电压极性同时改变时,则电机的旋转方向不变。

他励和并励直流电机一般采用电枢反接法来实现正反转。他励和并励直流电机不宜采用励磁绕组反接法实现正反转的原因是励磁绕组匝数较多,电感量较大。当励磁绕组反接时,在励磁绕组中便会产生很大的感生电动势,这将会损坏闸刀和励磁绕组的绝缘性。

串励直流电机宜采用励磁绕组反接法实现正反转。串励直流电机的电枢两端电压较高,而励磁绕组两端电压很低,反接容易,电机车常采用此法。

当直流电源通过电刷向电枢绕组供电时,电枢表面的 N 极下导体可以流过相同方向的电流,根据左手定则,导体将受到逆时针方向的力矩作用;电枢表面 S 极下部分导体也流过相同方向的电流,根据左手定则,导体也将受到逆时针方向的力矩作用。这样,整个电枢绕组即转子将按逆时针旋转,输入的直流电能就转换成转子轴上输出的机械能。电机主要由定子和转子组成,定子由机座、主磁极、端盖换向极、电刷装置等组成;转子(电枢)由电枢铁芯、电枢绕组、换向器、转轴和风扇等组成。

必须指出,由于直流电机的励磁绕组匝数较多,电感很大,因为把励磁绕组从电源上断开将产生较大的自感电动势,使开关或接触器产生很大的火花,影响它们的寿命和使用安全,同时过大的自感电动势还可能击穿励磁绕组线圈的绝缘层。因此,频繁反向的直流电机应采用改变电枢两端电压极性的方法来实现反转。

(3) 电机输出转矩:与流过电机线圈的电枢电流成正比。

输出转矩公式: $T = C_T \times \Phi \times I_a$, 其中 C_T 为转矩常数, Φ 为每极主磁通, I_a 为电枢电流。由此可知,电机转矩在磁通不变的情况下和电枢电流成正比。最大输出转矩就是电机能承受的最大电枢电流,电机在额定电流下输出绕组发热量较少,散热正常的话电机温度就不会升高,能长时间运行。但是在最大输出转矩下输出,由于电流较大,电机发热严重,散热系统不能给电机及时降温,时间一长就会烧毁电机。直流电机是靠端电压调节转速的,电压越高转速越快。绕组能够承受电流的大小决定了电机的最大输出转矩。

(4) 减速机(如图 3-15 所示)。

减速机是一种由封闭在刚性壳体内部的齿轮传动、蜗杆传动、齿轮-蜗杆传动所组成的独立部件,常用作原动件与工作机之间的减速传动装置。减速机也称为减速器或者齿轮箱,由

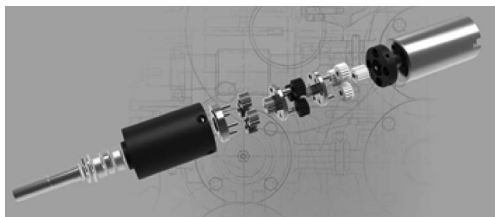


图 3-15 减速机

多套减速齿轮组啮合传动,通常用于低转速大转矩的传动设备。电机或其他高速运转的动力设备可通过与减速机的输入轴相连,减速机上的齿数少的齿轮与输出轴上的大齿轮啮合来达到减速的目的。大小齿轮的齿数之比就是传动比。减速机是由大小齿轮啮合输出转速,多级齿轮啮合,减速比更低,转矩更大。例如 $1:100$ 的减速比是电机转速 100r/min ,输出主轴 1r/min 。

减速比计算公式: 减速比 = 输入转速 ÷ 输出转速。

减速比即减速装置的传动比,是传动比的一种,是指减速机构中瞬时输入速度与输出速度的比值,用符号“ i ”表示。比如减速比 $1/64$,如果步进电机输出 $1\text{N} \cdot \text{m}$ 的转矩内的话,通过减速机转换后的输出力矩为 $64\text{N} \cdot \text{m}$,当然转速降低为原转速的 $1/64$ 。

一般减速比的表示方法是以 1 为分母,用“:”连接的输入转速和输出转速的比值,如输入转速为 1500r/min ,输出转速为 25r/min ,那么其减速比为 $i = 60:1$ 。一般减速机构的减速比标注都是实际减速比,但有些特殊减速机(如摆线减速机或者谐波波减速机等)有时候用舍入法取整,且不要分母,如实际减速比可能为 28.13 ,标注时一般标注 28 。

电机转速与输入电压成正比,如何实现电压的变化呢?

直流(有刷)电机通过调节电压、串接电阻、励磁都可以调速,但是实际以调节电压最为方便、常用。目前主要使用 PWM(Pulse Width Modulation, 脉冲宽度调制,简称脉宽调制)调速, PWM 其实就是通过高速的开关来实现直流的调压,在一个周期内,开的时间长,平均电压就高;关的时间长,平均电压就低,调起来很方便,只要开关速度够快,电网的谐波就少,且电流更为连续。

但是电刷和换向器长期磨损,同时在换向的时候有巨大的电流变化,非常容易产生火花,换向器和电刷限制了直流电机的容量和速度,使得直流电机的调速遇到了瓶颈。

PWM 是一种周期一定,且高低电平可调的方波信号(如图 3-16 所示)。当输出脉冲的频率一定时,输出脉冲的占空比越大,相对应的输出有效电压越大。PWM 可以应用在许多方面,如电机调速、温度控制、压力控制等。

对于无刷直流电机,调速的时候表面上只控制了输入电压,但电机的自控变频调速系统(无刷直流电机本身自带转子位置检测器等装置,使用此装置的转子位置信号来控制变压变频调速装置的换向时刻)自动根据变压控制频率,用起来和直流(有刷)电机几乎一样,非常方便。

由于转子采用永磁体,不需要专门的励磁绕组,所以在同等容量的情况下,电机体积更小,重量更轻,效率更高,结构更紧凑,运行更可靠,动态性能更好,在电动汽车的驱动等方面都获得了广泛的应用。

电机驱动 H 桥(如图 3-17 所示)用于解决电机换向问题。

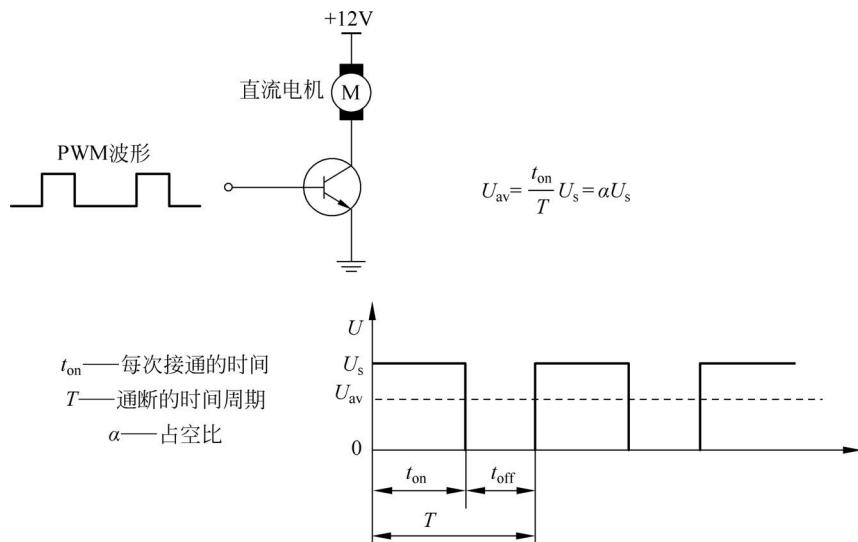


图 3-16 PWM 方波信号

4. 直流电机的应用

直流电机的结构应由定子和转子两大部分组成。直流电机是通过电枢和永磁体或电磁体之间的相互作用实现转动。在直流电机中，电枢被放置在永磁体或电磁体的磁场中，当电枢中通电时，它就会受到磁场的作用而旋转。

直流电机具有以下特点：

(1) 转矩大：直流电机的转矩与电枢电流成正比，因此可以通过控制电枢电流来调节输出转矩。

(2) 转速范围广：直流电机的转速范围广，可以通过改变电枢电流、电磁体的磁通量等方式来调节转速。

(3) 控制方便：直流电机的转速和转矩可以通过控制电枢电流、电磁体的磁通量、改变电枢和磁极之间的位置等方式来实现调节。

(4) 精度高：直流电机的输出转矩可以精确控制，因此可以在需要精确控制输出转矩的场合使用。

(5) 可逆性好：直流电机可以实现正转和反转，因此可以在需要改变转向的场合使用。

(6) 结构简单：直流电机的结构相对简单，维护和维修相对容易。

(7) 可靠性高：直流电机的运行稳定可靠，故障率相对较低。

总之，直流电机具有转矩大、转速范围广、精度高、可逆性好等特点，因此被广泛应用于需要调速或精确控制转矩的场合，如机器人、机床、自动化生产线、电动车等。

5. 直流电机的选型

一般认为，直流电机的选型过程主要包括以下几个步骤：

(1) 要明确需要的最大转矩大小，通过被驱动物体的转动惯量及需要的加速（或制动）性能来计算最大转矩，其中还要考虑克服摩擦需要多少转矩。

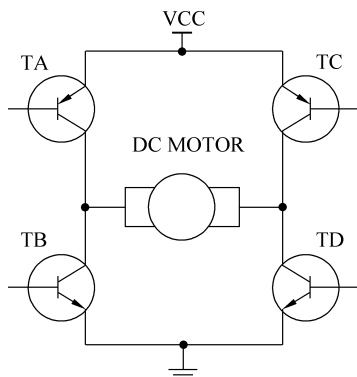


图 3-17 电机驱动 H 桥

- (2) 计算需要的工作转速。
- (3) 计算可用的电源额定电压和电流。
- (4) 计算工作时的转矩的平方根均值,也就是最大连续转矩(maximum continuous torque)。
- (5) 通过最大转矩和最大转速,算出电机的最大输出功率。
- (6) 选择减速齿轮箱的减速比,然后计算电机减速前的最大转矩和最大连续转矩。
- (7) 通过功率、转矩和转速指标,开始电机系列选型。
- (8) 开始绕组的选型。
- (9) 找出平均转矩变化斜率是多少。
- (10) 依据最大转速和最大转矩,计算无负载的转速(no-load speed)。
- (11) 计算最小目标速度常数。
- (12) 通过速度常数选型绕组,留有一定余量,也就确定了电机的具体型号。
- (13) 计算出最大电流,看是否超出供电的额定电流值。

3.3.3 各种电机的区别

(1) 普通电机:是最常见的电机,一般为直流有刷电机,如电动玩具、旋转灯、刮胡刀等均使用直流有刷电机。该电机具有转速快、扭力小的特点,一般只有两个引脚,将电池的正负极接上两个引脚就可转动,若将电池正负极相反地接在两个引脚上电机就可反向转。

(2) 减速电机:在电机上装一套减速机,就可以实现降低转速和增加扭力的目的,使得电机具有的更广泛的使用空间。

(3) 步进电机:是指将电脉冲信号转变为相应角位移或线位移的每输入一个脉冲信号,转子就转动一个角度或前进一步,其输出的角位移或线位移与输入的脉冲数成正比,转速与脉冲频率成正比。因为没有传感器,所以停止角度会有偏差。但是精确的脉冲信号会将偏差减至最低。步进电机适合低转速、转速调整范围较小的场合。

一个常见的误区是,步进电机精度比伺服电机低。实际上控制精度满足要求即可,精度高低是相对的。

(4) 舵机:舵机是国人的俗称,是一类直流伺服电机,最先用于小型航模,现在用于小型机器人关节,主要由外壳、电路板、驱动电机、齿轮与位置检测器构成。其工作原理是由舵机控制器发出信号给舵机,经由电路板上的 IC 判断转动方向,再驱动电机开始转动,通过减速齿轮将动力传至摆臂,同时由位置检测器送回信号,判断是否已经到达指定位置。位置检测器其实就是可变电阻,当舵机转动时电阻值也会随之改变,由检测到电阻值便可知道转动的角度。舵机的规格参数包含外形尺寸(mm)、转矩($\text{kg} \cdot \text{cm}$)、速度($\text{s}/60^\circ$)、测试电压(V)及重量(g)等。转矩的单位是 $\text{kg} \cdot \text{cm}$,意思是在摆臂长度 1cm 处,能吊起几千克重的物体。这就是力臂的观念,因此摆臂长度越长,则扭力越小。速度的单位是 $\text{s}/60^\circ$,意思是舵机转动 60° 所需要的时间。

(5) 伺服电机:伺服电机又称执行电机,在自动控制系统中,用作执行元件,把所收到的电信号转换成电机轴上的角位移或角速度输出。伺服电机分为直流和交流两大类,其主要特点是:当信号电压为零时无自转现象,转速随着转矩的增加匀速下降。伺服电机主要靠脉冲来定位,基本上可以这样理解,伺服电机接收到 1 个脉冲,就会旋转 1 个脉冲对应的

角度,从而实现位移,因为,伺服电机本身具有发出脉冲的功能,所以伺服电机每旋转一个角度,都会发出相应数量的脉冲,这样,和伺服电机接收的脉冲数形成对应关系,或者叫闭环,系统就会知道发了多少脉冲给伺服电机,同时收回了多少脉冲,从而精确地控制电机的转动,实现精确的定位。定位精度可以达到 0.001mm。

直流伺服电机分为有刷和无刷电机。有刷电机成本低,结构简单,启动转矩大,调速范围宽,容易控制,维护不方便(需要换碳刷),会产生电磁干扰,对环境有要求。因此它可以用于对成本敏感的普通工业和民用场合。

工业中使用最多的是伺服控制。伺服控制的原理主要是三环控制:电流环、速度环以及位置环。

(1) 电流环(内环): 根据电流环的指令电流快速而准确地控制电机。

(2) 速度环(中间环): 根据速度环的指令速度快速而准确控制电机,使得其不受负载影响,并快速跟踪指令速度的变化。

(3) 位置环(外环): 比较检测信号与给定值,输出位置环的指令速度,使执行件位置与指令位置一致。

伺服控制原理图如图 3-18 所示。

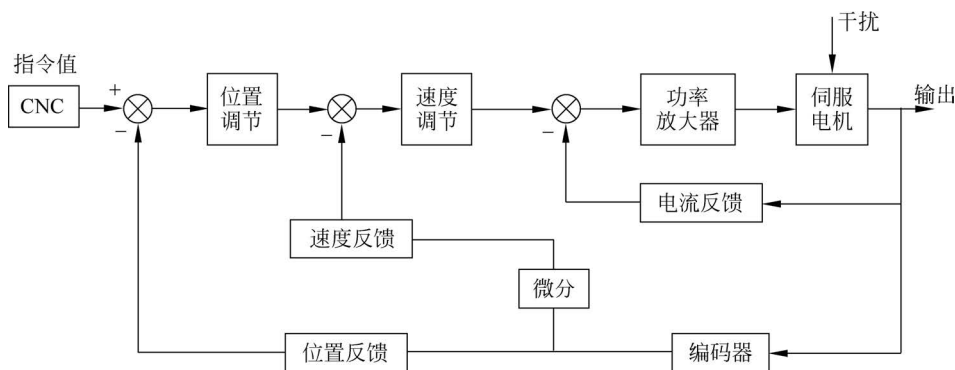


图 3-18 伺服控制原理图

3.3.4 交流电机

交流电机主要的供电方式为交流电供电。交流电机分同步和异步电机,同步主要用作发电机;异步主要用作电机。异步电机由于结构简单、价格便宜、维护方便、运行可靠等特点得到了广泛的应用。交流电机虽然结构简单,但是工作原理其实比直流电机要复杂一点。

电机的外壳是定子,定子上有三相对称交流绕组,由于三相电顺序变化,形成一个旋转的合成磁场,磁场的旋转速度就是同步转速。同步转速 $n = 60f/p$, f 是频率, p 是极对数,比如对于接入国家电网 50Hz 的 2 极电机(即极对数为 1 对),那么转速 $n = 60 \times 50/1 = 3000\text{rpm}$ 。同理,4 极、6 极、8 极电机同步转速为 1500r/min、1000r/min、750r/min。

如果让转子速度与定子磁场旋转速度相等,则成为同步电机,此时就需要把定子变成一个电磁铁或永磁铁,即给定子通电,这样不需要再切割磁感线就能旋转,旋转速度与磁场旋转速度相同,即形成同步电机。

同步电机转子结构比异步电机复杂,价格高,在生产生活中的应用不如异步电机广泛,主要用于发电机,现在火电站、水电站、汽轮机、水轮机中基本都是同步电机。

异步电机的调速:理论上改变交流电频率、电压、转子的电阻、电机的磁极分布都可以控制异步电机的转速,但是实际上无级调速可用调节频率和电压的方法实现。由于调压调速范围不大,一般只能用在调速要求不高的场合,因此应用并不广泛。

变频调速:说到变频,大家可能都听说过。变频调速的全称是变压变频调速(VVVF),也就是在改变频率的时候改变电压,这样异步电机的调速范围就足够大了。

变频器可以分为两大类:交交变频和交直交变频。

交交变频:将交流电直接通过电力电子器件变换为另一个频率的交流电,最高输出频率不能超过输入频率的一半,所以一般只用在低转速、大容量的系统中,可以省去庞大的齿轮减速机。

交直交变频:将交流电先整流变成直流,再通过逆变器变成可控频率和电压的交流,配合 PWM 技术,这种变频方式可以实现大范围的变压变频。

对于电动汽车来讲,异步电机皮实耐用,过载能力强,控制算法成熟。

同步电机的调速:同步机没有转差率,在结构确定的情况下,控制电压不能改变转速,所以在变频器出现之前,同步电机是完全不能调速的。

变频器的出现让交流同步电机也有了巨大的调速范围,因其转子也有独立励磁(永磁体或者电励磁),其调速范围要比异步电机更宽,因此同步电机焕发了新的生机。

同步电机变压变频调速系统可以分为他控变频调速和自控变频调速。

他控变频调速与异步电机的变频调速类似,也可以根据其数学模型采用 SVPWM 等方式来实现控制,其性能优于普通交流异步电机。

自控变频同步电机在发展过程中曾经有多个名字,如无换向器电机;当采用永磁体且输入三相正弦波时,可以称为正弦波永磁同步电机;如果输入方波,那么可以称为梯形波永磁同步电机,也就是类似于之前说的无刷直流机,所以无刷直流电机采用直流输入,但使用了同步电机的变频技术(结构与永磁同步电机相同),在特斯拉的 Model3 汽车上就采用了直流无刷电机。

除了三相交流异步电机,还有单相交流异步电机,其中又分为单相交流串励电机(有刷)和单相交流鼠笼式电机(无刷)。

单相串励电机俗称串励电机或通用电机(Universal Motor),其电枢绕组和励磁绕组串联在一起工作。

单相串励电机又叫作交直流两用串励电机,它既可以使用交流电源工作,也可以使用直流电源工作。

单相串励电机的优点是转速高、起动力矩大、体积小、重量轻、不容易堵转、适用电压范围很广,可以用调压的方法来调速,简单且易于实现。因而在电动工具(如角磨机、手电钻等)中得到广泛的应用。

单相串励电机的结构与直流串励电机十分相似,主要区别在于单相串励电机的定子铁芯必须由硅钢片叠压而成,而直流串励电机的磁极既可以由叠压而成,又可以做成整体结构。

单相串励电机调速时大多数采用调节电压的方法,也就是改变电动势。单相串励电机的电压调速方法采用的是可控移相调压,利用可控硅的触发电压滞后于输入电压实现对输

入电压的移相触发。在实现方法上有硬件和软件方式。调节电压方法采用可控硅调速技术,具有线路简单、元件体积小等特点,是一种简单有效的方法。

单相电流通过电枢绕组时产生的是脉振磁场而不是旋转磁场,所以单相异步电机不能自起动。为了解决起动问题,单相交流供电的异步电机实际上往往做成两相的。主绕组由单相电源直接供电;副绕组在空间上与主绕组差 90° (电角度,等于机械角度除以电机磁极对数)。副绕组串联电容或电阻后再接到单相交流电源,使其中通过的电流和主绕组中的电流有一定的相位差。使合成磁场成为椭圆形旋转磁场,甚至可能接近圆形旋转磁场。电机因此获得起动转矩。

利用电阻分相方法的电机价格低廉,例如,副绕组用较细的导线绕制即可,但分相效果较差,且电阻上要消耗能量。这种电机在起动并达到一定转速后,通常由装在电机轴上的离心式开关将副绕组自动切除,以减少电阻上的损耗,提高运行效率。一般用于起动转矩要求不高的场合,如小型车床、小型电冰箱等,缺点是不能调速。

利用电容分相,效果较好,有可能在电机某一工作点时,使电机合成磁场接近圆形旋转磁场,从而获得较好的工作特性。

交流电机的特点是:

(1) 交流电机制造成本比较低。

(2) 矢量变频技术的发展,已经可以用变频电机模拟成直流电。

(3) 相对于直流电机在结构简单、维护容易、对环境要求低以及节能和提高生产力等方面具有足够的优势,使得交流调速广泛运用于工农业生产、交通运输、国防以及日常生活中。

交流电机是用于实现机械能和交流电能相互转换的机械。由于交流电力系统的巨大发展,交流电机已成为最常用的电机。与直流电机相比,交流电机由于没有换向器,因此结构简单,制造方便,比较牢固,容易做成高转速、高电压、大电流、大容量的电机。交流电机功率的覆盖范围很大。交流电机按其功能通常分为交流发电机、交流电动机(如图 3-19 所示)等。

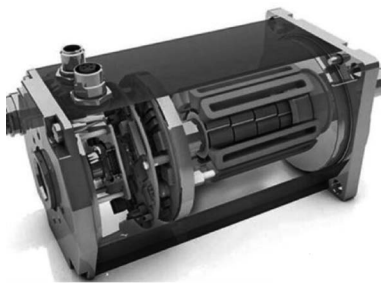


图 3-19 交流电机

由于电机工作状态的可逆性,同一台电机既可作发电机又可作电动机。把电机分为发电机与电动机并不很确切,只是有些电机主要作发电机运行,有些电机主要作电动机运行。

3.3.5 特种电机: 超声电机

1. 超声电机的原理

超声电机(Ultrasonic Motor, USM)技术是振动学、波动学、摩擦学、动态设计、电力电子、自动控制、新材料和新工艺等学科结合的新技术。超声电机不像传统的电机那样,利用电磁的交叉力来获得其运动和力矩。超声电机是利用压电陶瓷的逆压电效应和超声振动来获得其运动和力矩的,将材料的微观变形通过机械共振放大和摩擦耦合转换成转子的宏观运动。在这种新型电机中,压电陶瓷材料盘代替了许多铜线圈。

2. 超声电机的优点

与传统电机相比,具有结构简单、小型轻量、响应速度快、噪声低、低速且大转矩、易控制、

断电自锁、不受磁场干扰、运动准确等优点,另外还具有耐低温、真空等适应太空环境的特点。

首先由于质量轻、低速且大转矩从而不需要附加齿轮等变速结构,避免了使用齿轮变速而产生的振动、冲击、噪声、低效率、难控制等一系列问题。

其次,它突破了传统电机的概念,没有电磁绕组和磁路,不需要用电磁相互作用能量,而是利用压电陶瓷的逆压电效应、超声振动和摩擦耦合来转换能量,从而具有安静、污染小,定位精度高,不受电磁干扰等优点。可以说超声电机技术是世界上最新的高科技之一。

3.3.6 电机选型实际案例 1

搬运机器人电机减速器模块的电机转矩计算:根据设计方案,该搬运机器人相关参数如表 3-1 所示。

表 3-1 搬运机器人相关参数

参 数 名 称	相关数据与说明
额定承重	250kg
机器人自重	170kg
驱动方式	四轮驱动
爬坡能力	坡道角 $\alpha=30^\circ$
底盘尺寸(长 L 、宽 b 、高 h)	1500mm $\times$ 800mm $\times$ 250mm
轮胎直径	0.254m
直线行走速度	0.6m/s
拐弯速度	0.2~0.4m/s

当搬运机器人在水平道路上等速行驶时必须克服来自地面的滚动阻力和来自空气的阻力。但是机器人在起动前必须先克服静摩擦力,因为静摩擦力是机器人所受摩擦力中最大的,因此只要保证机器人能起动,之后所受的滚动阻力总是比静摩擦力小得多。故计算机器人的起动阻力即可,只要满足启动条件则满足运行条件,以符号 F_f 表示最大静摩擦力;以符号 F_w 表示空气阻力;以符号 F_i 表示坡道阻力;以符号 F_j 表示加速阻力。因此机器人运行的总阻力计算公式为

$$\sum F = F_f + F_w + F_i + F_j \tag{3-3}$$

(1) 静摩擦力的计算公式为

$$F_f = \mu N$$

式中, μ 是最大静摩擦系数,它与地面干湿度以及轮胎的材料有关,这里取 $\mu=0.6$, N 为垂直于接触面的正压力, $N=mg$, g 为牛顿引力常数, $g=9.8\text{m/s}^2$,代入公式得静摩擦力为

$$F_f = \mu N = 0.6 \times 420 \times 9.8 = 2469.6\text{N}$$

(2) 空气阻力的计算公式为

$$F_w = -\rho V^3 C_d A / 2 \tag{3-4}$$

式中, ρ 为空气密度; V 为速度; C_d 为气动阻力系数; A 为机器人迎风面积。由式(3-4)可知,空气阻力正比于速度的三次方,机器人最高时速为 0.6m/s,且机器人迎风面积比较小,因此空气阻力对机器人的影响可以忽略不计,故 $F_w=0\text{N}$ 。

(3) 坡道阻力的计算公式为

$$F_i = mg \sin\alpha$$

式中, α 为坡道的坡道角, 按照设计要求 $\alpha = 30^\circ$, 代入公式得坡道阻力为

$$F_i = mg \sin \alpha = 420 \times 9.8 \times \sin 30^\circ = 2058(\text{N})$$

(4) 加速阻力的计算公式为

$$F_j = ma$$

式中, a 为搬运机器人从起步到直线行走速度的加速度, 设机器人从原地起步走过 1m 时, 速度达到 $V_t = 0.6\text{m/s}$, 则其加速度为: $a = V_t^2 / 2 = 0.36 / 2 = 0.18\text{m/s}^2$ 。代入公式得加速阻力为

$$F_j = ma = 420 \times 0.18 = 75.6(\text{N})$$

根据式(3-3)可得机器人运行的总阻力为

$$\sum F = F_f + F_w + F_i + F_j = 2469.6 + 0 + 2058 + 75.6 = 4603.2(\text{N})$$

设机器人起动时是直线状态起动, 轮胎直径 $d = 254\text{mm}$, 则机器人总的运动阻力矩为

$$\sum M = \sum F \times r = 4603.2 \times 0.254 / 2 \approx 584.6(\text{N} \cdot \text{m})$$

因为机器人是由 4 套电机减速器驱动的, 因此单个电机减速器的运动阻力矩为

$$M = \sum M / 4 = 584.6 / 4 = 146.15(\text{N} \cdot \text{m})$$

综上所述, 机器人要想正常行驶, 单个电机的额定转矩必须要大于阻力矩 $146.15\text{N} \cdot \text{m}$ 。

1. 电机及减速器选型

由于工作电源的限制, 移动机器人一般使用直流电机, 常用直流电机的种类包括步进电机、直流伺服电机、直流无刷电机等。下面根据电机性能、用途及成本等方面对 3 种电机进行比较分析, 来确定搬运机器人的电机方案。

1) 步进电机

步进电机是将电脉冲激励信号转换成相应的角位移或线位移的离散值控制电机, 它只通过电脉冲信号来控制角度与转动圈数, 每输入一个电脉冲电机就动一步。步进电机没有传感器来对控制信号进行反馈, 所以电机的停止角度会有偏差, 控制精度没有伺服电机的高。因为没有测量电机转角的传感器, 步进电机不能输出大转矩, 但是在结构和价格上有一定的优势, 因此步进电机适用于载荷较小而且十分确定、位置精度要求并不非常高的工作场合。

2) 直流伺服电机

直流伺服电机是一个电机系统, 它包含电机、传感器和驱动器。伺服电机靠伺服控制电路来控制电机的转速, 通过电机传感器来控制转动位置, 所以速度控制和位置控制十分精确。伺服电机主要用于位置、速度或力矩输出比较精确的工作场合。因为加入了电机传感器, 所以伺服电机的结构较复杂, 成本也比较高。

3) 直流无刷电机

直流无刷电机是同步电机的一种, 是由电机主体和内部驱动构成的一种典型的机电一体化产品, 电机的定子绕组多做成三相对称星状接法, 同三相异步电机相似。相比于直流无刷伺服电机, 直流无刷电机缺少编码器, 因此在控制精度上要逊色于伺服电机, 但是电机价格也相对较低。

因为搬运机器人主要用于室外场合的搬运, 对电机的转矩要求比较高, 而对电机控制精度的要求没有那么高, 所以直流无刷电机即可满足使用要求, 且直流无刷电机的成本要比伺服电机低很多, 综合考虑, 选择大功率直流无刷电机作为搬运机器人的运动电机。

直流无刷电机的转速一般都很高, 而搬运机器人则要求低速、大转矩行驶, 故需要给电

机配置合适的减速器来降低电机的转速,从而增大电机的输出力矩。

直流电机减速器的种类繁多,按照传动类型可分为齿轮减速器、蜗轮蜗杆减速器和行星齿轮减速器;按照传动级数不同可分为单级和多级减速器;按照电机输入轴与减速器输出轴之间的角度关系可分为直角减速器和平行轴减速器。为了节省机器人的内部横向安装空间和减速器的成本,这里选择直角蜗轮蜗杆减速器作为电机的减速器。电机及减速器装配实物如图 3-20 所示。

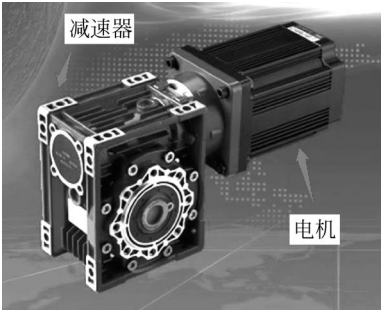


图 3-20 电机及减速器装配图

电机的参数如表 3-2 所示。

表 3-2 电机参数

项 目	参 数
功率	2000W
电压	48V
额定转速	2000rpm
额定电流	46.08A
额定转矩	9.55N·m

当给电机装配减速器以后,因为蜗轮蜗杆减速器存在传动效率的问题,所以电机的转速和转矩并不是按照减速比直接换算的,电机减速器装配以后的转矩参数如表 3-3 所示。

表 3-3 电机减速器转矩参数

减 速 比	额定输出转速/rpm	额定输出力矩/N·m
7.5	267	57.3
10	200	76.4
15	133	114.6
20	100	149.0
25	80	181.5
30	67	212.0
40	50	216.0
50	40	177.0
60	33	200.0
80	25	180.0
100	20	139.0

根据表 3-3 可知,当减速器的减速比为 20 时,电机减速器的额定输出力矩为 149.0N·m, $149.0\text{N}\cdot\text{m} > M = 146.15\text{N}\cdot\text{m}$,即单个电机的额定转矩大于阻力矩。故当选取减速器的减速比为 20 以上时,电机减速器的转矩就能满足要求,这里选取减速器的减速比为 20。

2. 电机速度仿真分析

为了验证所选取电机的转矩和转速是否满足要求,下面根据电机的实际工作情况对电机进行速度仿真分析。首先给电机预加工作负载:给定电机额定输出力矩 $M=149.0\text{N}\cdot\text{m}$,同时给定电机指令转速 $n=1000\text{r/min}$ 。通过不断调整驱动器控制速度环的增益参数,在上位机软件上得到电机的仿真实验结果,即电机速度检测示波图和电机速度检测放大图,分别如图 3-21 和图 3-22 所示。

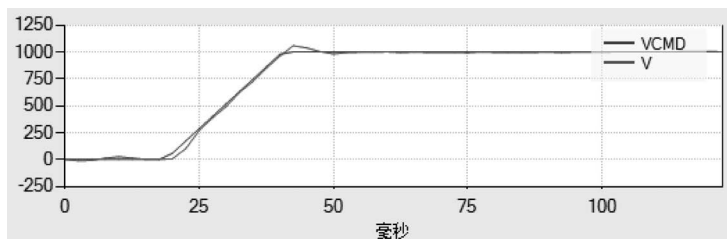


图 3-21 电机速度检测示波图

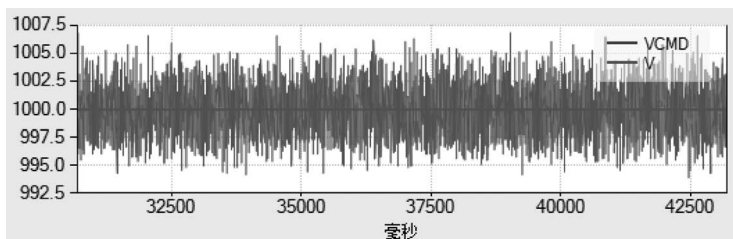


图 3-22 电机速度检测放大图

在图 3-21 和图 3-22 中,VCMD 表示电机的指令转速,V 表示电机的实际工作转速。由图 3-21 可知,电机工作转速在刚开始启动的 50ms 短时间内出现剧烈波动响应,但是随后进入稳定状态,即稳定在电机的指令转速水平线附近,最终两者变化趋势基本吻合。由图 3-22 可知,将电机速度检测示波图放大,可以发现电机工作转速与指令转速的误差波动基本稳定在 0.7% 以内。

根据电机速度仿真分析可知,在电机额定输出力矩一定的情况下,电机速度误差非常小,可以忽略不计,能够满足搬运机器人对电机平稳运行的要求。

3. 机器人电机驱动器模块

机器人经常使用的电机可分为无刷电机和伺服电机,同理,相对应的电机驱动器模块分为无刷驱动器和伺服驱动器。伺服驱动相对于无刷驱动具有控制精度高的优点,但是成本偏高。本节所研究的搬运机器人主要用于室外搬运,对电机驱动的精度没有那么高的要求,结合经济性考虑,决定使用大功率无刷驱动器。

该搬运机器人使用无刷驱动器采用 ARM 高速芯片控制,可应用于传统的 PLC 或单片机控制系统,通过驱动器自带的霍尔输出 PWM、频率或模拟量信号对无刷电机进行调速。该驱动器实物如图 3-23 所示。

无刷驱动器的技术参数规格如表 3-4 所示。



图 3-23 无刷驱动器实物图

表 3-4 无刷驱动器的技术参数规格

项 目	最 小 值	典 型 值	最 大 值	单 位
电压	20	36	60	V
电流	5	75	100	A
逻辑输入电流	10	20	50	mA
霍尔供电电源		5		VDC
转速控制	150	3000	50 000	rpm

驱动器通过自带的霍尔端口与电机霍尔编码器相连接,而与上位机控制器的通信方式主要有两种。一种是 RS485 通信方式,采用 MODBUS 标准通信协议。驱动器与上位机进行通信时,要求上位机具有相同的 RS485 通信接口并采用相同通信协议。无刷驱动器 RS485 通信协议参数如表 3-5 所示。

表 3-5 无刷驱动器 RS485 通信协议参数

项 目	参 数
最大从机台数	16 台
波特率	9600bps
数据交换方式	异步串行,半双工
传送协议	MODBUS 通信协议 RTU
数据位	8 位
停止位	1 位
校验位	无
错误检查方式	CRC16 校验
帧长度	8 字节固定

驱动器与上位机的另一种通信方式是机器人控制系统常用的 PWM(Pulse-Width Modulation,脉冲宽度调制),利用控制器的数字输出来对模拟电路进行控制的一种技术。该无刷驱动器的数字控制信号端口参数如表 3-6 所示。

表 3-6 无刷驱动器的数字控制信号端口参数

名 称	说 明
DC+/DC-	直流电压输入端(DC24~48V)
U,V,W	电机相线
Hu,Hv,Hw	霍尔信号线
VCC	霍尔供电电源+(+5VDC)
GND	霍尔供电电源-(0V)
+5V	外接电位器供电
SV	外接调速,使用内部调速时悬空
COM	公共端口(低电平)
F/R	控制方向,高电平时为正转,低电平反转
EN	控制信号使能端,高电平停车,低电平运行
BRK	刹车,低电平时为正常工作,高电平停机
SPEED	速度信号输出端
ALARM	速度信号输出端

3.3.7 机器人实际驱动电机选型案例 2

电机选型要考虑电机负载能力、运行速度、工作电压、温度等参数。选择一款合适的电机,有利于优化机器人的动力性能。如果电机性能不能满足要求,则机器人负载时动力不足,无法移动;如果电机性能过剩,则会造成动能和性能浪费,所以电机选型是机器人设计的重要环节,是机器人实现稳定运行的保障。步进电机、伺服电机、直流无刷电机是目前广为应用的 3 种电机。

步进电机是一种应用在轻负载且对速度要求不高的工作场合的电机。其工作原理依靠通过依次改变定子的磁场而产生磁力矩带动转子运动。步进电机价格低、控制简单、应用广泛。

伺服电机系统采用的是闭环控制方式,通过编码器可以随时获得电机转速等参数。通过控制三相电流相序控制其转速,应用于大扭力、大转速且对精度要求比较高的工作场景。

直流无刷电机是一种常用控制电机。直流无刷电机控制通过模拟量实现,其旋转速度性能取决于转子的旋转频率,具有高转速、高转矩特性,配合减速器能够满足较大范围内的速度要求。

综合上述分析,自动引导机器人驱动系统采用伺服电机作为动力来源。自动引导机器人的驱动单元包括驱动轮系流、驱动电机系统。引导机器人伺服电机的性能,例如转矩、转速、功率等,都可决定机器人载重和动力性能。选择电机时,要根据实际性能需求进行预先计算,从而有效避免动力不足和性能过剩情况的发生。现在很多伺服电机在有负载需求的情况下,不能直接用作动力输出,需要与减速机相配合,才能进行应用。减速机的选择可以根据实际减速比、转矩等材料选择,且与电机之间的配合越来越趋于通用化。减速机选择更加方便,即使品牌、生产厂家不同也能根据实际需求进行配合使用,使得机器人驱动系统的设计更加高效。

1. 自动引导机器人运行阻力计算

自动引导机器人要求自重 40kg,载重 100kg,爬坡 15° ,则机器人自身重力为

$$F_n = mg = 140 \times 9.8 = 1372(\text{N})$$

机器人在水平路面上行驶阻力主要为地面的滚动摩擦力和空气阻力。但是机器人刚启动时车轮为滑动摩擦力,所以在启动前必须先要克服静摩擦力;因为静摩擦系数是三者中最大的,对应的静摩擦力也是最大的,因此只要保证机器人能启动,就能满足相应需求。自动引导机器人还需要具有相应的爬坡能力,因此还有坡度阻力。最大静摩擦力 F_f 、空气阻力 F_k 、坡度阻力 F_p 和加速阻力 F_j 之间的关系为

$$\sum F = F_f + F_k + F_p + F_j$$

自动引导机器人静摩擦力计算,在室内环境下,地面和橡胶车轮之间的最大静摩擦系数为 0.4~0.6,在考虑一定余量的情况下,静摩擦系数选取为 0.7。代入静摩擦力计算公式得到

$$F_f = \mu F_n = 960.4\text{N}$$

加速阻力为自动引导机器人从静止状态,加速到规定速度时惯性力。机器人从静止状态下加速到 0.4m/s 时,行走 1m,则其加速度为 0.08m/s^2 。根据公式,加速阻力为

$$F_j = ma = 11.2\text{N}$$

坡度阻力的计算。预设坡度角度为 15° ,路面比较平整,则坡度阻力为

$$F_p = mgsina = 356.72N$$

由于机器人行驶速度较慢,迎风面积小,空气阻力 F_k 可以忽略不计,所以自动引导机器人运行总阻力为

$$\sum F = F_f + F_k + F_p + F_j = 1328.32N$$

2. 电机型号选择

选择驱动电机时不仅要考虑转速,电机驱动力矩是更为重要的参数。影响力矩重要原因便是驱动轮的直径,直径增大时,速度会增大,驱动力矩则变小。根据设计方案,机器人采用差速驱动,橡胶车轮直径 150mm,所以机器人的总运动阻力矩为

$$\sum M = \sum F \times r = 99.624N \cdot m$$

驱动电机力矩至少为

$$T = \frac{M}{2} = 49.812N \cdot m$$



图 3-24 伺服电机

综合考虑自动引导机器人的控制要求、定为精度以及使用成本等多方面的因素之后,最终选择德马克 400W 无刷直流伺服电机配以 PLH64 行星减速机的电机模块。电机示意图如图 3-24 所示。

PLH64 行星减速机额定输出力矩为 $33N \cdot m$,最大输出转矩为 $66N \cdot m$ 。机器人理论满载转矩小于行星减速机的最大输出转矩,且机器人在大部分工作时间不会达到满载,所以此设计方案满足性能要求。其电机模块规格参数见表 3-7。

表 3-7 电机模块规格参数

项 目	参 数
额定功率/kW	0.4
额定电压/V	48
额定转速/rpm	3000
额定电流/A	$10 \pm 10\%$
极数	10
耐热等级	F
最高转速/rpm	3600
瞬时最大电流/A	$25 \pm 10\%$

3.3.8 电机控制环路调试

为了提高伺服电机的精度,需要对电机控制环路进行调试。此款电机通过上位机软件,允许调整电机速度环和电流环参数,位置环参数默认自动调整,所以不需要进行调试。上位机界面如图 3-25 所示。

电流环调节能够实现自动调节。电流环自动调节算法将一个方波命令作用于电流环,并且调整电流环的比例增益 C_p 和积分增益 C_i ,直到获得理想的波形。通过自动调节测得电流环比例增益为 336,电流环积分增益为 228,电机额定电流约为 10A,可以得到电机理论电机和实际电流变化规律。实际电流在每次转动方向变化时,会出现超调的情况,调整后实

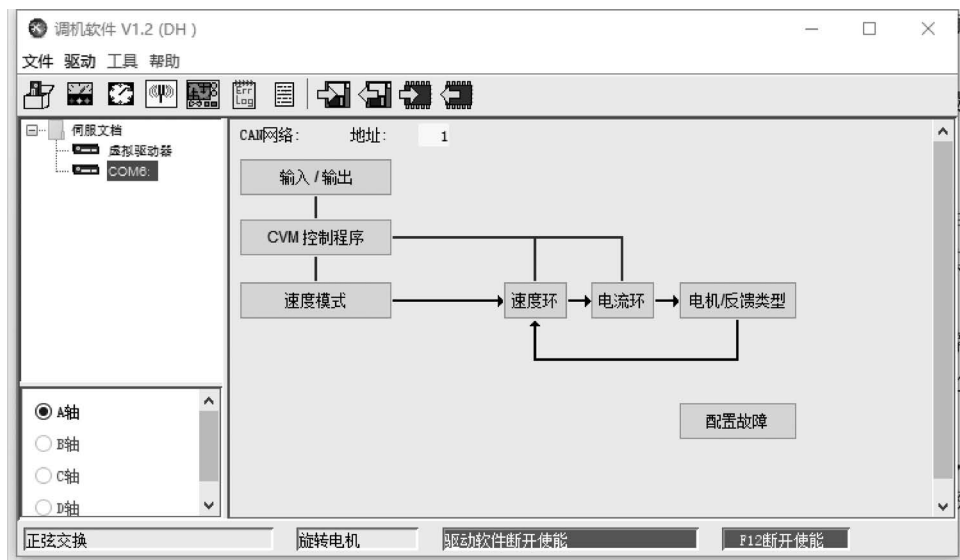


图 3-25 上位机界面

际电流和理论电流误差较小,符合要求。调试前的电流变化曲线如图 3-26 所示,调试后的电流变化曲线如图 3-27 所示。

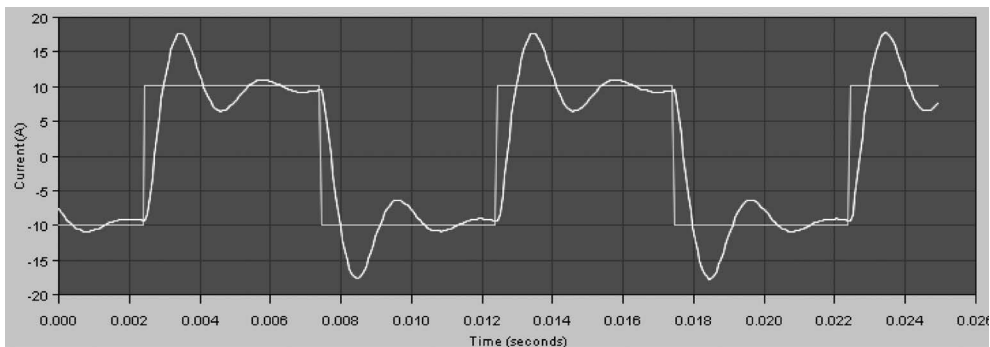


图 3-26 调试前的电流变化曲线

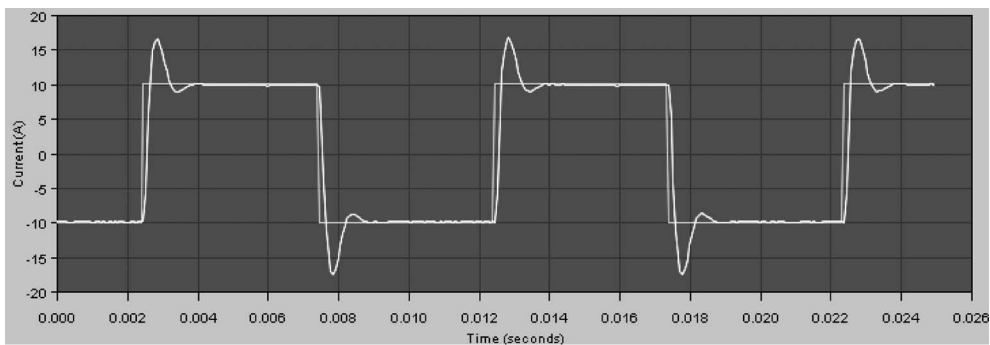


图 3-27 调试后的电流变化曲线

速度环需要手动调节,将一个方波作用在速度环上,调整速度比例增益 V_p 和速度积分增益 V_i 获得理想的波形。电机转速设定为 500rpm,速度比例增益 V_p 和速度积分增益 V_i

最大值为 32 767。通过多次实际实验调试,最终确定速度比例增益 V_p 值为 92,速度积分增益 V_i 值为 21。通过函数发生器窗口可以查看调试前后实际速度和理论速度变化规律。调试前的速度变化曲线如图 3-28 所示,调试后的速度变化曲线如图 3-29 所示。

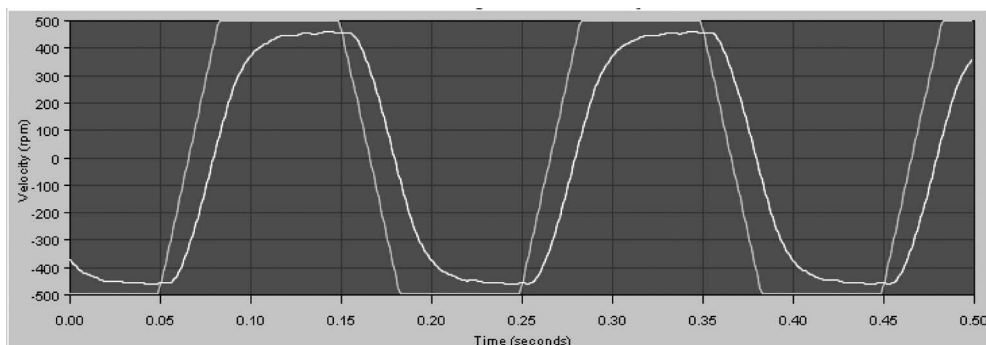


图 3-28 调试前的速度变化曲线

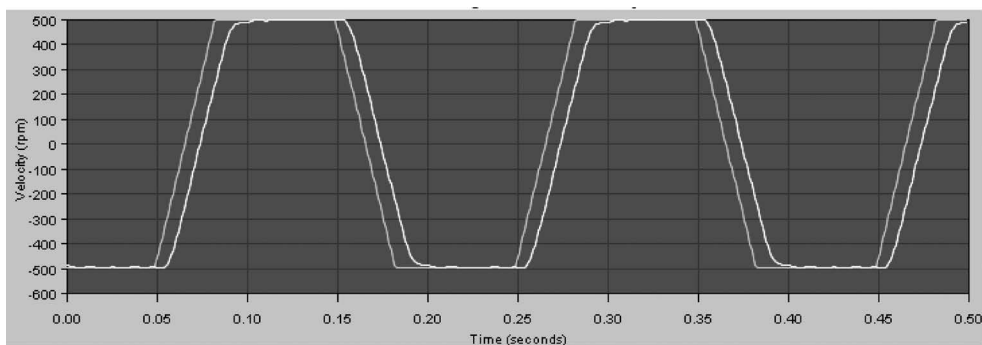


图 3-29 调试后的速度变化曲线

通过调试,调试后的实际速度更加接近额定速度,误差较小,精度更高。

3.4 机械臂机构设计

作为机器人的抓取机构,机械臂可为机器人实现精确抓取提供可能,是机器人系统中的重要环节。机械臂主要执行机构由连杆机构、电机、电机连接板、摆臂等组成。

3.4.1 机械臂的分类

机械臂(如图 3-30 所示)根据结构形式的不同分为多关节机械臂、直角坐标系机械臂、球坐标系机械臂、极坐标机械臂和柱坐标机械臂等。

图 3-31 为常见的六自由度机械臂,它由 X 移动、 Y 移动、 Z 移动、 X 转动、 Y 转动、 Z 转动 6 个自由度组成。

水平多关节机械臂一般有 3 个主自由度: Z_1 转动、 Z_2 转动、 Z_3 移动。通过在执行终端加装 X 转动、 Y 转动可以到达空间内的任何坐标点。

直角坐标系机械臂有 3 个主自由度: X 移动、 Y 移动、 Z 移动、通过在执行终端加装 X 转动、 Y 转动、 Z 转动可以到达空间内的任何坐标点。

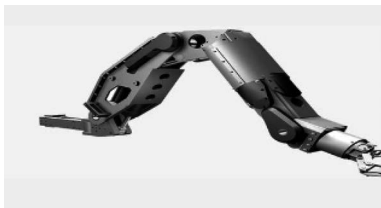


图 3-30 机械臂图片

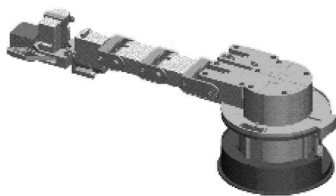


图 3-31 六自由度机械臂

3.4.2 机械臂的作用

机械臂一般有 3 个运动：伸缩、旋转和升降。实现旋转、升降运动是横臂和支柱去完成。机械臂的基本作用是将手爪移动到所需位置和承受手爪抓取工件的最大重量，以及机械臂本身的重量等：

机械臂由以下几部分组成：

(1) 运动元件。如油缸、气缸、齿条、凸轮等是驱动机械臂运动的部件。

(2) 导向装置。保证机械臂的正确方向及承受由于工件的重量所产生的弯曲和扭转的力矩。

(3) 机械臂。起着连接和承受外力的作用。机械臂上的零部件，如油缸、导向杆、控制件等都安装在手臂上。

此外，根据机械臂运动和工作要求，如管路、冷却装置、行程定位装置和自动检测装置等一般也装在机械臂上。所以机械臂的结构、工作范围、承载能力和动作精度都直接影响机械臂的工作性能。

3.4.3 机械臂的设计要求

1. 机械臂应承载能力大、刚性好、自重轻

机械臂的刚性直接影响到机械臂抓取工件时动作的平稳性、运动的速度和定位精度。如刚性差则会引起机械臂在垂直平面内的弯曲变形和水平面内侧向扭转变形，机械臂就要产生振动，或动作时工件卡死无法工作。为此，机械臂一般都采用刚性较好的导向杆来加大机械臂的刚度，各支撑、连接件的刚性也要有一定的要求，以保证能承受所需要的驱动力。

2. 机械臂的运动速度要适当，惯性要小

机械臂的运动速度一般是根据产品的生产节拍要求来决定的，但不宜盲目追求高速度。

机械臂由静止状态达到正常的运动速度为启动，由常速减到停止不动为制动，速度的变化过程为速度特性曲线。

机械臂自身重量轻，其启动和停止的平稳性就好。

3. 机械臂动作要灵活

机械臂的结构要紧凑小巧才能使机械臂运动轻快、灵活。在运动臂上加装滚动轴承或采用滚珠导轨也能使机械臂运动轻快、平稳。此外，对于悬臂式的机械臂，还要考虑零件在机械臂上布置，就是要计算机械臂移动零件时的重量对回转、升降、支撑中心的偏重力矩。偏重力矩对机械臂运动很不利，偏重力矩过大，会引起机械臂的振动，在升降时会发生一种沉头现象，还会影响运动的灵活性，严重时机械臂与立柱会卡死。所以在设计机械臂时要尽

量使机械臂重心通过回转中心,或离回转中心要尽量接近,以减少偏力矩。对于双臂同时操作的机械臂,则应使两臂的布置尽量对称于中心,以达到平衡。

4. 位置精度高

机械臂要获得较高的位置精度,除采用先进的控制方法外,在结构上还要注意以下几个问题:

(1) 机械臂的刚度、偏重力矩、惯性力及缓冲效果都直接影响机械臂的位置精度。

(2) 加设定位装置和行程检测机构。

(3) 合理选择机械臂的坐标形式。直角坐标式机械臂的位置精度较高,其结构和运动都比较简单、误差也小。回转运动产生的误差是放大时的尺寸误差,当转角位置一定时,机械臂伸出越长,其误差越大。关节式机械臂因其结构复杂,手端的定位由各部关节相互转角来确定,其误差是积累误差,因而精度较差,其位置精度也更难保证。

(4) 通用性强,能适应多种作业;工艺性好,便于维修调整。

以上这几项要求,有时可能相互矛盾——刚性好、载重大,结构往往粗大、导向杆也多,增加机械臂自重;转动惯量增加,冲击力就大,位置精度就低。因此,在设计机械臂时,需根据机械臂抓取重量、自由度数、工作范围、运动速度及机械臂的整体布局和工作条件等各种因素综合考虑,以达到动作准确、可靠、灵活、结构紧凑、刚度大、自重小,从而保证一定的位置精度和适应快速动作。此外,对于热加工的机械臂,还要考虑热辐射,机械臂要较长,以远离热源,并需装有冷却装置。对于粉尘作业的机械臂还要加装防尘设施。

3.5 机器人整体结构材料的选择原则

在制作智能车时需要多方面考虑材料的选用,如何从各种各样的材料中选择出合适的材料,是一项受多方面因素所制约的工作。这里简单介绍一下材料的选用原则。

1. 载荷应力的大小和性质

这方面的因素主要是从强度观点来考虑,应在充分了解材料的力学性能的前提下进行选择。脆性材料原则上只适用于制造在静载荷下工作的零件。在多少有些冲击的情况下应以塑性材料作为主要使用的材料。

金属材料的性能一般可通过热处理加以提高和改善,因此,要充分利用热处理的手段来发挥材料的潜力。对于最常用的调质钢,由于其回火温度不同,可得到力学性能不同的毛坯,所以在选择材料的品种时,应同时规定其热处理规范,并在图纸上标明。

2. 零件的工作情况

零件的工作情况指零件所处的环境特点、工作温度、摩擦磨损的程度等。

在湿热的环境下工作的零件,其材料应具有良好的防锈和耐腐蚀能力,例如,选用不锈钢合金等。

工作温度对材料选择的影响,一方面要考虑互相配合的两零件的线膨胀系数不能相差过大,以免在温度变化时产生过大的热应力,或者是配合松动;另一方面也要考虑材料的力学性能随温度而改变的情况。

零件在工作中有可能发生磨损之处,要提高其表面硬度,以增强耐磨性。因此,应选择适于进行表面处理的淬火钢、渗碳钢、淡化钢等品种。

3. 零件的尺寸和质量

零件尺寸及质量的大小与材料的品种及毛坯制取方法有关。用铸造材料制造毛坯时,一般可以不受尺寸及质量的限制;而用铸造材料制造毛坯时则须注意段亚机械及设备的生产能力。此外,零件尺寸和质量的大小还和材料的强重比有关,应尽可能选用强重比大的材料,以便减小零件尺寸和质量。

4. 零件结构的复杂程度及材料的加工可能性

结构复杂的零件宜选用铸造毛坯,或用板材冲压出原件后再经焊接而成。结构简单的零件可用锻造法制取毛坯。

对材料工艺性的了解,在判断加工可能性方面起着重要的作用。铸造材料的工艺性是指材料的液体流动性、收缩率、偏析程度及产生缩孔的倾向性等。焊接材料的工艺性是指材料的延展性、热脆性及冷态和热塑性变形的能力等。材料的热处理工艺只看材料的可淬性、淬火变形倾向及热处理介质对它的渗透能力等。

5. 材料的经济性

材料的经济性主要表现在以下几方面:

(1) 材料本身的相对价格。当用价格低廉的材料能满足使用要求时,就不应该选择价格高的材料。这对于大批量制造的零件尤为重要。

(2) 材料的加工费用。例如,制造某些箱体类零件,虽然铸铁价格低廉,但在小批量生产时,选择钢铁焊接比较有利,因其可以省掉铸模的生产费用。

(3) 材料的利用率。例如,采用无切屑或少切屑毛坯(如精铸、模锻、冷拉毛坯等),可以提高材料的利用率。此外,在结构设计时也应设法提高材料的利用率。

(4) 采用组合结构。例如,火车车轮是在一般材料的轮芯外部热套上一个硬度高而耐磨轮箍,这种方法叫作局部品质原则。

(5) 节约稀有材料。例如,用普通的铝青铜代替锡青铜制轴瓦,用锰、硼系合金钢代替铬镍系合金钢等。

(6) 材料的供应状况。选材时还应考虑到当时当地材料的供应状况。为了简化供应和储存的材料品种,对于小批量制造的零件,应尽可能地减少同一部机器上使用的材料品种和规格。

3.6 机器人软件系统设计

作为机器人系统的决策和智能控制单元,机器人的编程语言是机器人系统软件的重要组成部分,其发展与机器人技术的发展是同步的。

3.6.1 软件系统设计概要

现代技术的发展使各种设备功能更强大,数据处理速度成倍增加。与纯软件开发又不同,嵌入式系统开发受硬件束缚,软件编程与产品有很大的相关性,因此在设计过程中,需要将软件设计的相关经验适当调整,以适应嵌入式系统开发的特点。C语言的使用也适应了这一要求,使人们能够更加规范地开发项目。这里对一些对机器人嵌入式系统开发有指导意义的原则、方法和思想做一个简要介绍。

1. 确立工作项目

在进行任何一项工作之前,必须首先对它的可行性进行分析,其次要进行需求分析。如果要完成一个数据采集系统,就必须知道数据采集速度的要求,选用目前市场上的器件是否可以达到此要求。在认为可行的情况下,需要知道包括硬件、软件、程序开发包、调试的各种工具、需要使用的技术等。只有在这些基本需求可以满足的情况下才可以进行下一步设计。

2. 建立设计文档

不管是软件设计还是硬件设计,经验教训告诉人们,只有建立完备的文档,才有可能对工作步骤具有指导意义,同时为以后的调试和维护提供帮助。这里包括开始的设计文档以及开发过程中的文档。

3. 合理的语言程序

用C语言编写程序时,首先要注意变量的命名要易于理解,命名的习惯要一致,至少在同一个项目中如此。其次,要适当地使用空格,使程序层次分明,增加可读性,这也利于程序的维护。最后,良好的注释也是必要的,对于程序中的关键部分,以及功能和作用需要给出详细注释。

4. 模块化设计

嵌入式系统应用时一般都是一个完整的最小系统,因此它会包括很多部分,各个部分要协调工作,将每个部分设计成模块会增加可读性,也利于调试。主要模块有初始化模块、数据采集模块(输入模块)、数据处理模块、时间模块、决策模块、操作控制模块、显示模块、通信模块、自检模块等。这些模块并不都是必需的,可根据实际情况而定。

5. 系统可靠性设计

可靠性设计包括硬件可靠性设计和软件可靠性设计两方面。硬件可靠性技术是指看门狗电路,它通常是一块在有规律的时间间隔中进行更新的硬件,其更新一般由微控制器来完成。如果在一定间隔内没能更新看门狗,那么看门狗将产生复位信号,重置复位微控制器。复位电平的宽度和幅度都应满足芯片的要求,并且要保持稳定。复位电平应与电源上在同一时刻发生,即芯片一上电,复位信号就产生。如果没有经过复位,那么微控制器中的寄存器的值为随机值,上电时就会按PC寄存器中的随机内容开始运行程序,这样很容易进行误操作或进入死机状态。软件可靠性的技术是指通过指定的软件算法,保证在硬件出现一些干扰信号的情况下仍然能够正常工作。例如,在一定时间内要输出一个控制信号,如果该信号只送出去一次,直到下一个控制信号出现,这段时间内如果有干扰信号,那么就会出现误动作。这时可以用采集每个周期都送出一一次信号的办法迅速修正该误动作。在通信时,这种干扰信号会更多,这时保证信号的可靠性将变得更加重要。

6. 系统实施与仿真调试

在仿真前应做好充分的准备。嵌入式硬件仿真器给嵌入式系统开发者带来了极大的方便,同时也很容易造成人们的依赖性。很多时候,没有仿真器能促使人们写出更高质量的程序。在自己完成工作的基础上,人们总结了以下在硬件仿真调试之前应做的准备工作:

(1) 程序编写完后,应对代码仔细逐行检查,检查代码的错误,检查代码是否符合编程规范。

(2) 对各个子程序进行测试。可以编制一个调用该子程序的代码,建立要测试子程序的入口条件,并运行以确认它是否按预期结果输出。

(3) 软件仿真器功能十分强大。软件仿真可以防止因硬件的错误,如器件损坏、线路断路或短路而引起调试的错误。

(4) 开始硬件仿真,记录仿真调试过程中的问题,建立相关文档。

7. 软件维护

软件维护与软件开发同样重要。新开发出来的系统很难一次成型,系统的要求或功能很可能会根据实际情况的变化而变化,这时就需要在一定程度上修改。程序的任何修改都需要记录下来,包括各个版本的使用情况,做了什么样的改动,以及修正的错误等。只有这样,才能保证系统的可靠性和安全性,否则会在不知道已改动情况下,误操作或使用,造成不可想象的损失。

软件的维护中还有一个十分重要的问题:当人们发现控制系统中出现的问题既可以通过软件算法避开或者解决,也可以通过硬件方式的调整来解决时,如果有可能,应该去修改硬件设计,因为可靠的硬件是整个系统正常运行的保证。

3.6.2 软件系统总体设计

软件系统总体设计包括计算机配置设计、系统模块结构设计、数据库和文件设计、代码设计以及系统可靠性与内部控制设计等内容。

1. 嵌入式系统设计总体思路

基于操作系统的软件设计主要分为3个层次,即应用程序层、操作系统层和硬件驱动层,需要设计的程序只是应用程序层和硬件驱动层。硬件驱动层主要提供各个硬件模块的功能接口,方便应用程序使用。用户在硬件驱动层的基础上编写应用程序,应用程序由操作系统进行管理。

2. 基于行为系统设计方法

移动机器人设计的最终目标是通过设计和编程实现机器人的自主移动,准确快速地完成给定的任务。在实现过程中,首先需要为机器人描述出希望它所执行的任务,然后据此列出其所应具备的物理功能,最后通过编写相应的软件使机器人完成这些任务。解决这种复杂问题的一种强有力的工具是简化法,也就是把比较困难的大问题分解成一系列比较简单的、易于理解和解决的小问题。这种简化过程需要遵循一个原则或依据一种方法。对于自主移动机器人来说,基于行为系统设计方法就是一个有效的解决途径。

采用基于行为系统设计方法需要为机器人设计一系列简单行为,这些行为相互协调,产生人们所需求的机器人整体行为。在这里,行为框图是一个非常有用的图形工具,它能够帮人们理解机器人都做了些什么,以及机器人按照什么方式工作。

行为框图以图形方式表示基于行为的机器人的相关操作。从最高层次来看,机器人由感知单元、智能单元和执行单元组成。机器人的相关环境信息通过传感器传递给智能单元内部的一些基本行为模块。在机器人的整个任务执行过程中,包括巡线行为、拾取积木行为、投放积木行为和避障行为等基本行为。机器人利用仲裁器将这些基本行为模块所计算出的运动命令进行融合或选择,并将仲裁后的最终命令发送给电机去执行。

基本的行为由一个触发单元和控制单元组成。其中,控制单元用来将感知信息转换为机器人所要执行的控制命令,而触发单元用来确定在什么情况下控制单元应该为机器人的执行器产生指令输出。基本行为的这两个组成单元都可以检测相同的或者不同的传感器信

息,以便确定自己的动作。

所以,在进行控制系统程序设计时,可以按照行为框图的基本行为将机器人的任务划分为一个个行为模块,完成程序模块设计,最后完成整个控制系统软件的集成。

3.6.3 软件系统开发工具介绍

软件开发工具是用于辅助软件生命周期过程的基于计算机的工具。通常可以设计并实现工具来支持特定的软件工程方法,减少手工方式管理的负担。与软件工程方法一样,它们试图让软件工程更加系统化。工具的种类包括支持单个任务的工具及囊括整个生命周期的工具。

1. 基于工作阶段的工具

基于各个阶段对信息的需求不同,软件开发工具可分为3类:设计工具、分析工具、计划工具。

设计工具是最具体的,它是指在实现阶段对人们提供帮助的工具。例如,各种代码生成器、一般所说的第四代语言和帮助人们进行测试的工具(包括提供测试环境或测试数据)等,都属于设计工具之列。它是最直接帮助人们编写与调试软件的工具。

分析工具主要是指用于支持需求分析的工具,例如,帮助人们编写数据字典的、专用的数据字典管理系统;帮助人们绘制数据流程图的专用工具;帮助人们绘制系统结构图或ER图的工具等。它们不是直接帮助开发人员编写程序,而是帮助人们认识与表述信息需求与信息流程,从逻辑上明确软件的功能与要求。

计划工具则是从更宏观的角度去看待软件开发。它不仅从项目管理的角度帮助人们组织与实施项目,把有关进度、资源、质量、验收情况等信息有条不紊地管理起来,而且考虑到项目的反复循环、版本更新,还实现了跨生命周期的信息管理与共享,为信息以及软件的复用创造了条件。

2. 基于集成程度划分的工具

集成化程度是指用户接口一致性和信息共享的程度,是一个新的发展阶段。集成化的软件开发工具要求人们对于软件开发过程有更深入的认识和了解。开发与应用集成化的软件开发工具是应当努力研究与探索的课题,集成化软件开发工具也常称为软件工作环境。

3. 基于硬件、软件的关系划分的工具

基于与硬件和软件的关系,软件开发工具可以分为两类:依赖于特定计算机或特定软件(如某种数据库管理系统)和独立于硬件与其他软件的开发工具。一般来说,设计工具多是依赖于特定软件,因为它生成的代码或测试数据不是抽象的,而是具体的某一种语言的代码或该语言所要求的格式的数据。分析工具与计划工具往往独立于机器与软件,集成化的软件开发工具常常依赖于机器与软件。

4. 基于应用领域划分的工具

根据应用领域的不同,应用软件可以分为事务处理、实时应用、嵌入式应用等。随着个人计算机与人工智能的发展,与这两个方面相联系的应用软件也取得了较大的进展。

3.6.4 软件开发工具的分类

软件系统开发工具可分为以下几类:

- (1) 软件需求工具,包括需求建模工具和需求追踪工具。
- (2) 软件设计工具,用于创建和检查软件设计,因为软件设计方法的多样性,这类工具的种类很多。
- (3) 软件构造工具,包括程序编辑器、编译器和代码生成器、解释器和调试器等。
- (4) 软件测试工具,包括测试生成器、测试执行框架、测试评价工具、测试管理工具和性能分析工具。
- (5) 软件维护工具,包括理解工具(如可视化工具)和再造工具(如重构工具)。
- (6) 软件配置管理工具,包括追踪工具、版本管理工具和发布工具。
- (7) 软件工程管理工具,包括项目计划、风险管理工具和度量工具。
- (8) 软件工程过程工具,包括建模工具、管理工具和软件开发环境。
- (9) 软件质量工具,包括检查工具和分析工具。

3.6.5 SolidWorks 软件简介

机器人硬件设计常用设计软件有很多,比如 SolidWorks、ProE、Autodesk 等。这里以 SolidWorks 为主要介绍对象,简单介绍设计软件的特性与作用。

SolidWorks 公司成立于 1993 年,由 PTC 公司的技术副总裁与 CV 公司的副总裁发起,总部位于马萨诸塞州的康克尔郡。当初成立公司的目标是希望在每一个工程师的桌面上提供一套具有生产力的实体模型设计系统。

SolidWorks 软件是世界上第一个基于 Windows 开发的三维 CAD 系统,由于技术创新符合 CAD 技术的发展潮流和趋势,因此 SolidWorks 公司于两年间成为了 CAD/CAM 产业中获利最高的公司。良好的财务状况和用户支持使得 SolidWorks 每年都有数十乃至数百项的技术创新,公司也获得了很多荣誉。该系统在 1995—1999 年获得全球微机平台 CAD 系统评比第一名;从 1995 年至今,已经累计获得十七项国际大奖,其中仅从 1999 年起,美国权威的 CAD 专业杂志 CADENCE 连续 4 年授予 SolidWorks 最佳编辑奖,以表彰 SolidWorks 的创新、活力和简明。至此,SolidWorks 所遵循的易用、稳定和创新三大原则得到了全面落实,由于使用了 Windows OLE 技术、直观式设计技术、先进的 Parasolid 内核以及良好的与第三方软件的集成技术,SolidWorks 成为全球装机量最大、最好用的软件。资料显示,目前全球发放的 SolidWorks 软件使用许可约 28 万,涉及航空航天、机车、食品、机械、国防、交通、模具、电子通信、医疗器械、娱乐工业、日用品/消费品、离散制造等分布于全球 100 多个国家的约 3.1 万家企业。在教育市场上,每年来自全球 4300 所教育机构的近 145 000 名学生完成了 SolidWorks 的培训课程。据世界上著名的人才网站检索,与其他 3D CAD 系统相比,与 SolidWorks 相关的招聘广告比其他软件的总和还要多,这客观说明了越来越多的工程师在使用 SolidWorks,越来越多的企业会雇佣 SolidWorks 人才。据统计,全世界用户每年使用 SolidWorks 的时间已达 5500 万小时。在美国,包括麻省理工学院(MIT)、斯坦福大学等在内的著名大学已经把 SolidWorks 列为制造专业的必修课,国内的一些大学(教育机构),如清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、上海教育局等也在应用 SolidWorks 进行教学。通过使用它,设计师大大缩短了设计时间,从而使产品快速、高效地投向市场。

SolidWorks 软件功能强大,组件繁多。SolidWorks 功能强大、易学易用和技术创新是

SolidWorks 的三大特点,使得 SolidWorks 成为领先的、主流的三维 CAD 解决方案。SolidWorks 能够提供不同的设计方案、减少设计过程中的错误以及提高产品质量。SolidWorks 不仅可提供强大的功能,同时对每个工程师和设计者来说,其操作简单方便、易学易用。熟悉微软的 Windows 系统的用户基本上都可以用 SolidWorks 来进行设计。SolidWorks 独有的拖曳功能使用户在比较短的时间内完成大型装配设计。使用 SolidWorks,用户能在比较短的时间内完成更多的工作,能够更快地将高质量的产品投放市场。在目前市场上所见到的三维 CAD 解决方案中,SolidWorks 是设计过程比较简便的软件之一。美国著名咨询公司 Daratech 所评论:“在基于 Windows 平台的三维 CAD 软件中,SolidWorks 是最著名的品牌,是市场快速增长的领导者。”在强大的设计功能和易学易用的操作协同下(包括 Windows 风格的拖放、点击、剪切/粘贴),使用 SolidWorks,整个产品设计是百分之百可编辑的,零件设计、装配设计和工程图之间是全相关的。如图 3-32 所示为 SolidWorks 2019 的启动页面。



图 3-32 SolidWorks 2019 启动页面

SolidWorks 软件具有如下特点。

1) 全动感用户界面

SolidWorks 提供了一整套完整的动态界面和鼠标拖动控制。“全动感”的用户界面减少了设计步骤,减少了多余的对话框,从而避免了界面的凌乱。崭新的属性管理员界面用来高效地管理整个设计过程和步骤。属性管理员界面包含所有的设计数据和参数,而且操作方便、界面直观。用 SolidWorks 资源管理器可以方便地管理 CAD 文件。SolidWorks 资源管理器是唯一一个同 Windows 资源器类似的 CAD 文件管理器。特征模板为标准件和标准特征提供了良好的环境。用户可以直接从特征模板中调用标准的零件和特征,并与同事共享。SolidWorks 提供了 AutoCAD 模拟器,使得 AutoCAD 用户可以保持原有的作图习惯,顺利地从二维设计转向三维实体设计。

2) 配置管理

配置管理是 SolidWorks 软件体系结构中非常独特的部分,它涉及零件设计、装配设计

和工程图。配置管理使得用户能够在一个 CAD 文档中,通过对不同参数的变换和组合,派生出不同的零件或装配体。

3) 协同工作

SolidWorks 提供了技术先进的工具,使得用户可通过互联网进行协同工作,通过 eDrawings 方便地共享 CAD 文件。eDrawings 是一种极度压缩的、可通过电子邮件发送的、自行解压和浏览的特殊文件。通过三维托管网站展示生动的实体模型。三维托管网站是 SolidWorks 提供的一种服务,用户可以在任何时间、任何地点快速查看产品结构。SolidWorks 支持 Web 目录,用户将设计数据存放在互联网的文件夹中,就像存本地硬盘一样方便。利用 3D Meeting 通过互联网可实时地协同工作。3D Meeting 是基于微软 NetMeeting 技术开发的专门为 SolidWorks 设计人员提供的协同工作环境。

4) 装配设计

在 SolidWorks 中,当生成新零件时,可以直接参考其他零件并保持这种参考关系。在装配环境中,可以方便地设计和修改零部件。对于超过一万个零部件的大型装配体, SolidWorks 的性能得到了极大的提高。SolidWorks 可以动态地查看装配体的所有运动,并且可以对运动的零部件进行动态的干涉检查和间隙检测。采用智能零件技术可自动完成重复设计。智能零件技术是一种崭新的技术,用来完成诸如将一个标准的螺栓装入螺孔中,而同时按照正确的顺序完成垫片和螺母装配的工作。镜像部件是 SolidWorks 技术的巨大突破。镜像部件能产生基于已有零部件(包括具有派生关系或与其他零件具有关联关系的零件)的新的零部件。SolidWorks 用捕捉配合的智能化装配技术,来加快装配体的总体装配。智能化装配技术能够自动捕捉并定义装配关系。

5) 工程图

SolidWorks 提供了能够生成完整的、车间认可的详细工程图的工具。工程图是全相关的,当修改图纸时,三维模型、各个视图、装配体都会自动更新。从三维模型中自动产生工程图,包括视图、尺寸和标注。增强了的详图操作和剖视图,包括生成剖中剖视图、部件的图层支持、熟悉的二维草图功能以及详图中的属性管理员。使用 RapidDraft 技术,可以将工程图与三维零件和装配体脱离,进行单独操作,以加快工程图的操作,但保持与三维零件和装配体的全相关。用交替位置显示视图能够方便地显示零部件的不同位置,以便了解运动的顺序。交替位置显示视图是专门为具有运动关系的装配体而设计的独特的工程图功能。

填空题

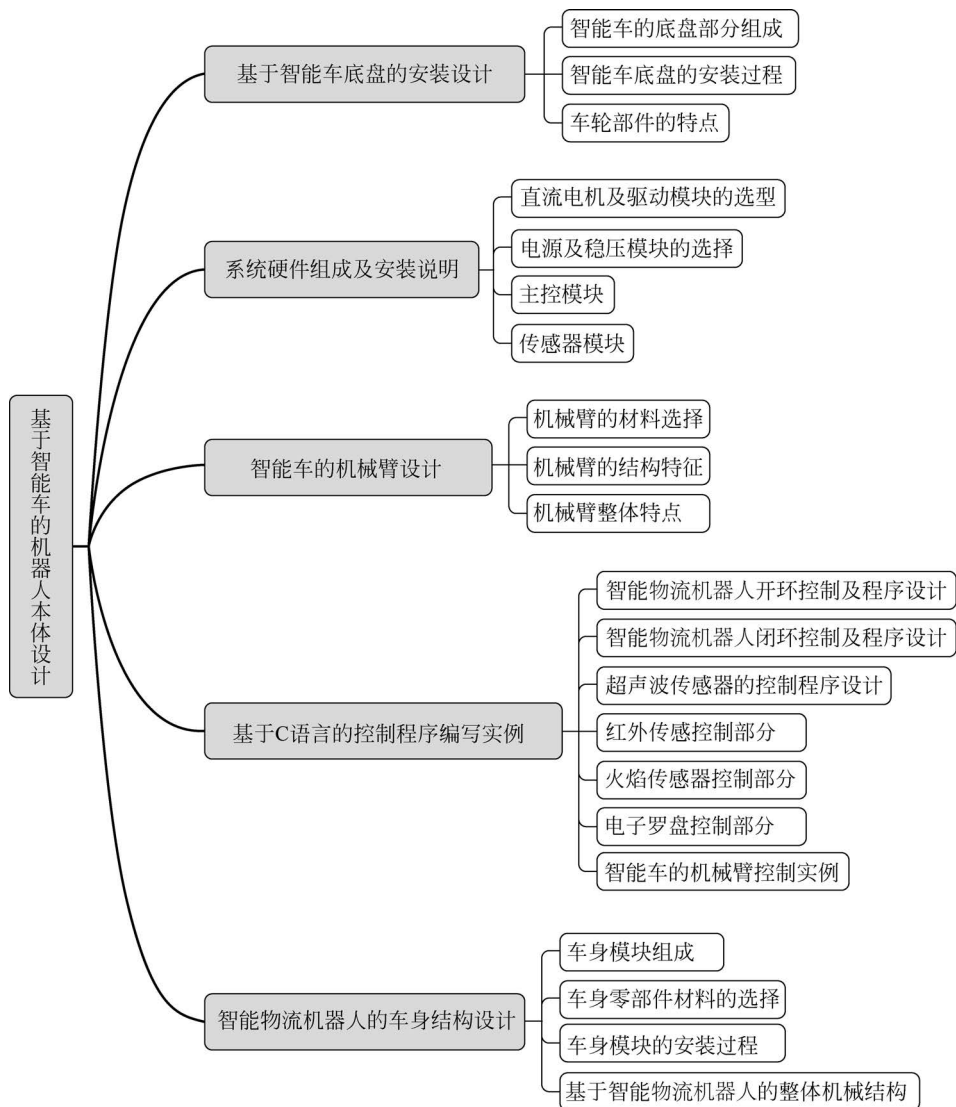
1. 常用的行走机构有_____种,分别为_____。
2. 机械臂一般有 6 个自由度,分别为_____,_____,_____,_____,_____,_____。
3. 根据电机工作电源的不同,可分为_____和_____。
5. 机器人系统中一般电机类型有_____,_____,_____,_____。
6. SolidWorks 是用来建立_____模型。

简答题

1. 简述机械臂的作用。
2. 简述步进电机的工作原理。

计算题

现有一台自动引导机器人,自重 30kg,载重 50kg。爬坡 20° ,坡面平整,爬坡加速度为 0.05m/s^2 。坡面和橡胶车轮之间的最大静摩擦系数为 0.6。试求自动引导机器人运行总阻力。



第4章思维导图