

<http://shop107331911.taobao.com>



Robot Dog

机器人技术及应用

<http://shop107331911.taobao.com>



Robot Dog

<http://shop107331911.taobao.com>

第三章 机器人驱动系统

这里所说的机器人驱动就是机电一体化系统中的执行装置，包括机器人驱动系统和机器人执行系统。

执行系统就是按照电信号的指令，将来自电、液压和气压等各种能源的能量转换成旋转运动、直线运动等方式的机械能的装置。按利用的能源来分类，主要可分为电动执行装置、液压执行装置和气动执行装置。

驱动系统应用



<http://shop107331911.taobao.com>

驱动系统应用



零零科

ROBOT DOG



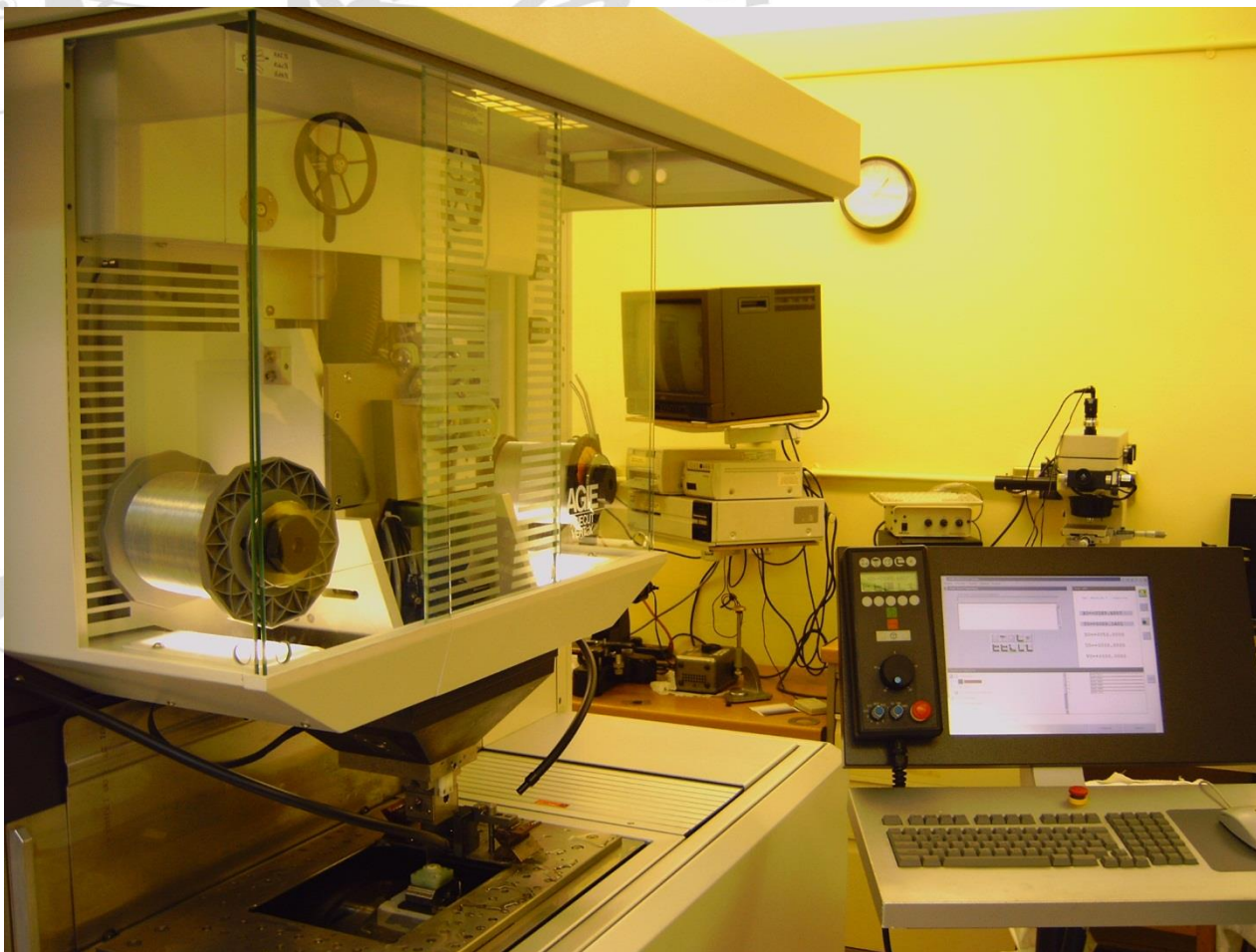
<http://shop107331911.taobao.com>

驱动系统应用



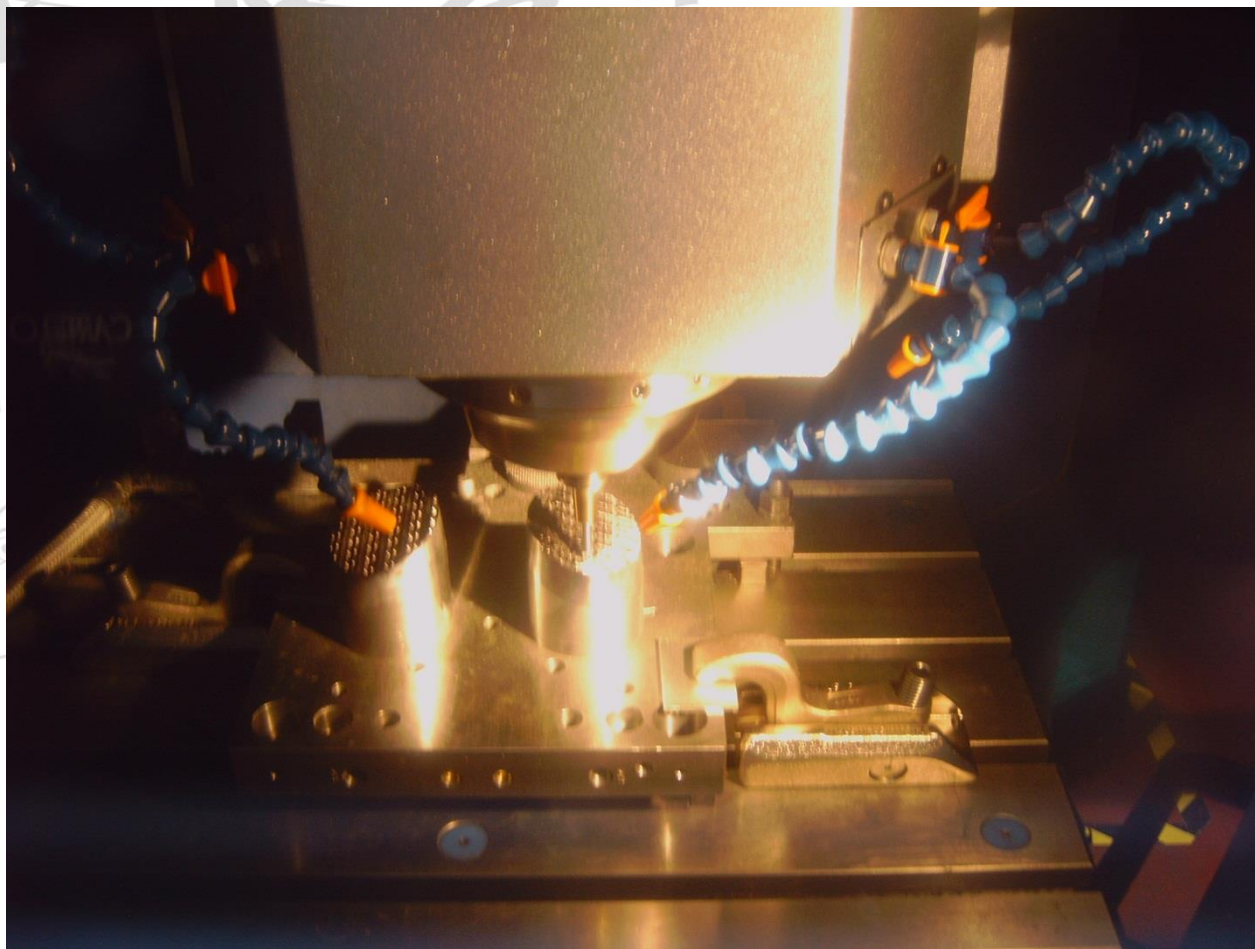
线切割机

驱动系统应用



MEMS 加工设备（1微米孔加工设备）

驱动系统应用



高速加工中心（**10微米**）

驱动系统应用

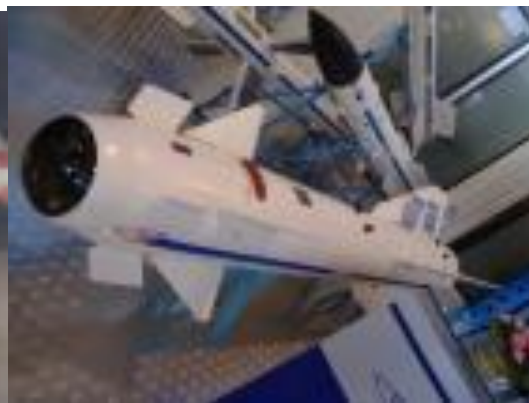


用整块金属加工出来的航空发动机叶轮

用整块金属加工出来的苹果计算机外壳



驱动系统应用



ROBOT DOG

<http://shop107331911.taobao.com>

驱动系统应用



驱动系统应用



中国“嫦娥二号”卫星进入总体测试阶段

主要目的 ◀ 为“嫦娥三号”任务实现月球软着陆进行部分关键技术试验
对“嫦娥三号”着陆区进行高精度成像



模拟图

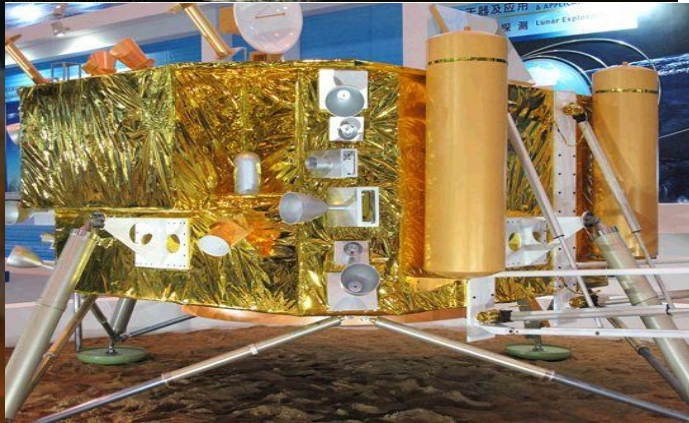
目前已进入总体测试阶段的“嫦娥二号”卫星

成功突破了 {

- 地月转移轨道发射
- X频段测控
- 近月捕获
- 环月飞行轨道控制
- 深空测控通信
- 高分辨率立体相机研制

} 等 6 项关键技术

高微 编制 新华社发



驱动系统应用



3.1 机器人驱动系统的分类

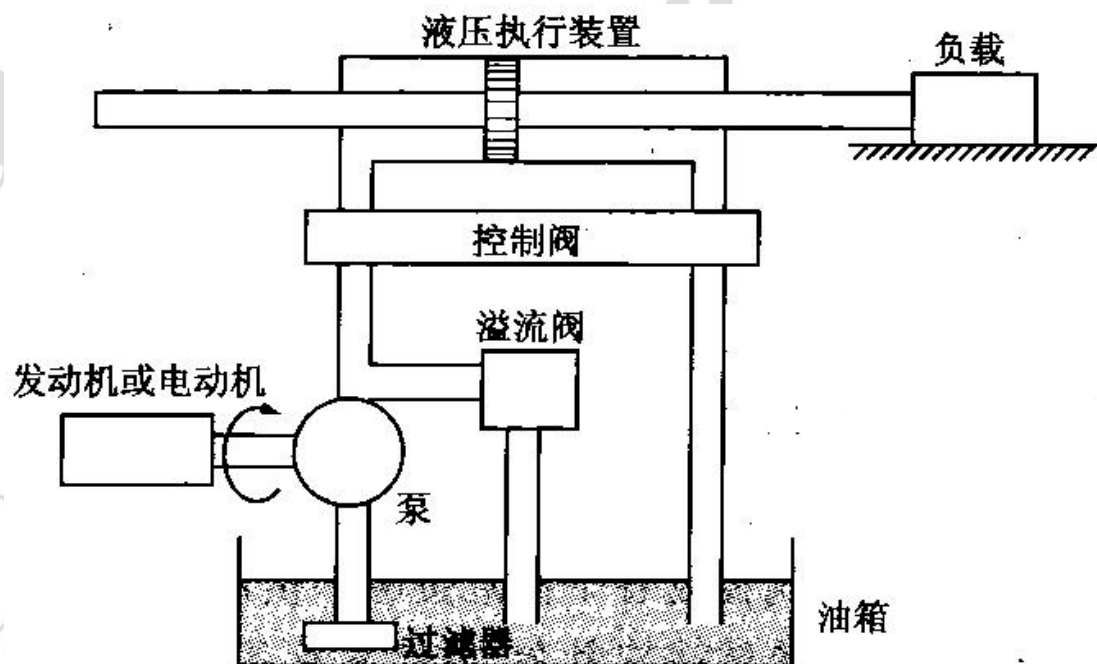
根据能量转换方式，将驱动器划分为液压驱动、气压驱动、电气驱动和新型驱动装置。在选择机器人驱动器时，除了要充分考虑机器人的工作要求，如工作速度、最大搬运物重、驱动功率、驱动平稳性、精度要求外，还应考虑到是否能够在较大的惯性负载条件下，提供足够的加速度以满足作业要求。

3.1 机器人各驱动系统的特点

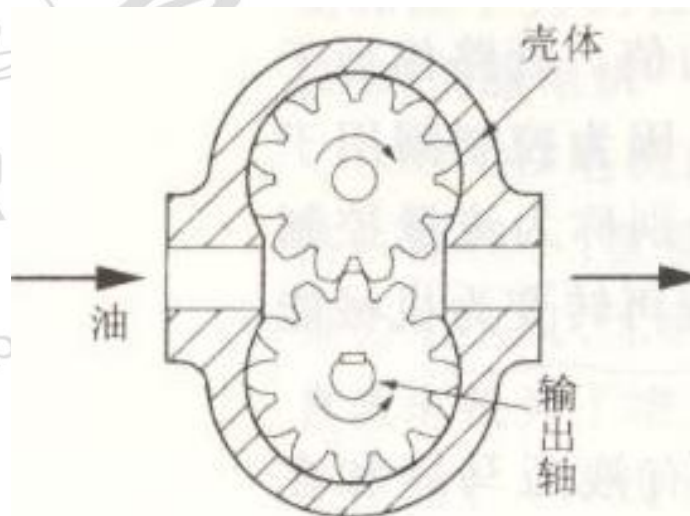
工作 能量	功率源	能量变换元件	功率变换控制器	
			阀式控制	功率源控制
机械式 (动力)	原动机、飞轮	无	离合器、飞轮	无
流体式 (压力)	液压(气)泵、蓄能器	液压(气动)、马达或缸	伺服阀、比例阀等	变量泵
电气式 (电力)	商用电源(发电机)、蓄电池	电动机、动铁或动圈式元件	开关、晶体管、可控硅等	可变电电压发电机

3.2.1 液压驱动

液压缸



液压马达



液压驱动的特点：

优点：

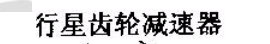
- (1) 容易获得比较大的扭矩和功率；
- (2) 功率/重量比大，可以减小执行装置的体积；
- (3) 刚度高，能够实现高速、高精度的位置控制；
- (4) 通过流量控制可以实现无级变速。

缺点：

- (1) 必须对油的温度和污染进行控制，稳定性较差；
- (2) 有因漏油而发生火灾的危险；
- (3) 液压油源和进油、回油管路等附属设备占空间较大。

3. 2.2气动驱动

执行装置的



气动驱动的特点：

优点：（1）利用气缸可以实现高速直线运动；

（2）利用空气的可压缩性容易实现力控制和缓冲控制；

（3）无火灾危险和环境污染；

（4）系统结构简单，价格低。

缺点：（1）由于空气的可压缩性，高精度的位置控制和速度控制都比较困难，驱动刚性比较差；

（2）虽然撞停等简单动作速度较高，但在任意位置上停止的动作速度很慢；

（3）噪音大；

3.3 电气驱动

1

直流电机

2

交流电机

3

步进电机

2

舵机

机电控制系统简介

❖ 一、电动机控制系统

□ 直流伺服电动机



每年全世界需要微电机**15亿**台(套)

直流伺服电动机近年来不断在结构上进行改进,使性能得到了提高。控制用的直流伺服电动机的特征是**惯性小、起动力矩大、启动时能迅速达到要求的速度,能承受频繁的加、减速**,设计得当不存在散热、退磁等问题。在机械手、数控机床等方面都得到了应用。

一、电动机控制系统

❖ 直流伺服电动机

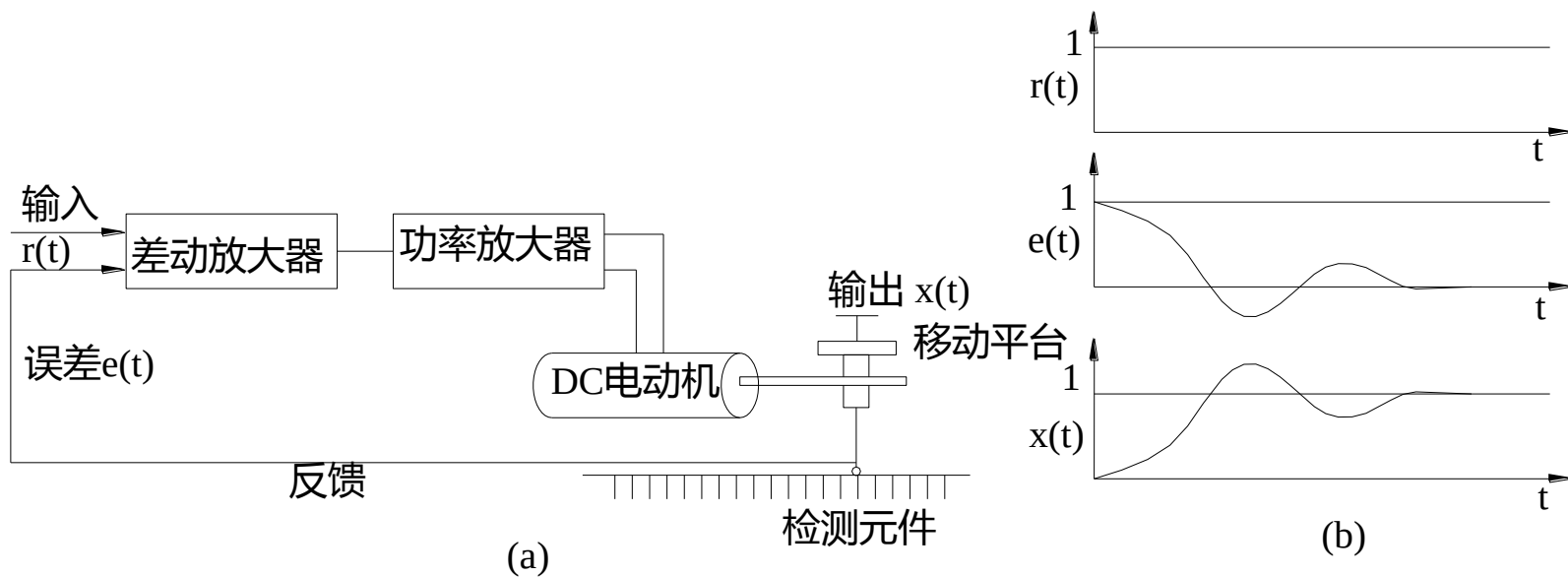


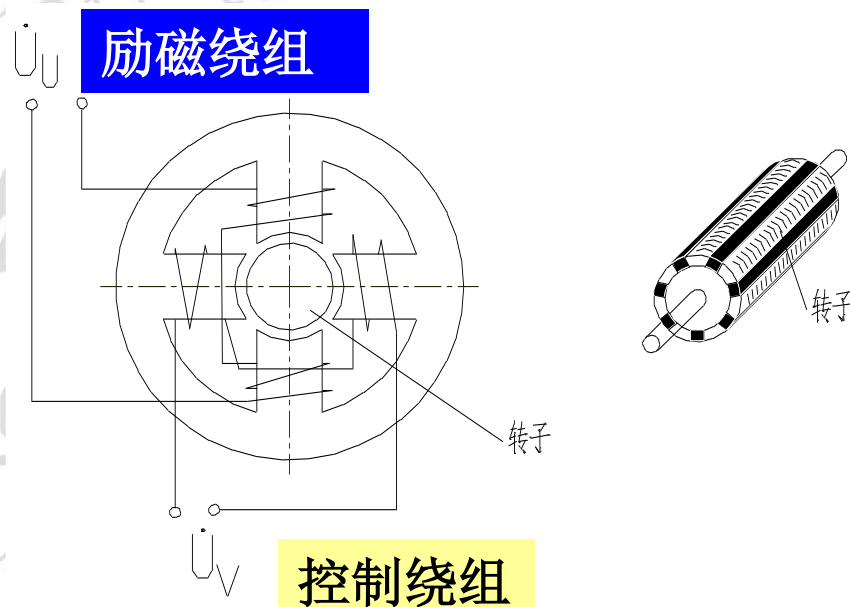
图1-3 直流伺服电动机反馈控制系统及其响应曲线

一、电动机控制系统

❖ 交流伺服电动机

交流伺服电动机就是两相异步电动机。它的定子上装有两个绕组，一个是励磁绕组，另一个是控制绕组。两者在空间相隔 90° 。交流伺服电动机目前有两种，一种为笼形转子，另一种为杯形转子。笼形转子的制作与三相笼形异步电动机转子相似。但**从结构上，为了减少转动惯量常做成细长形**，并且转子导体采用高导电率的铝或黄铜制成。

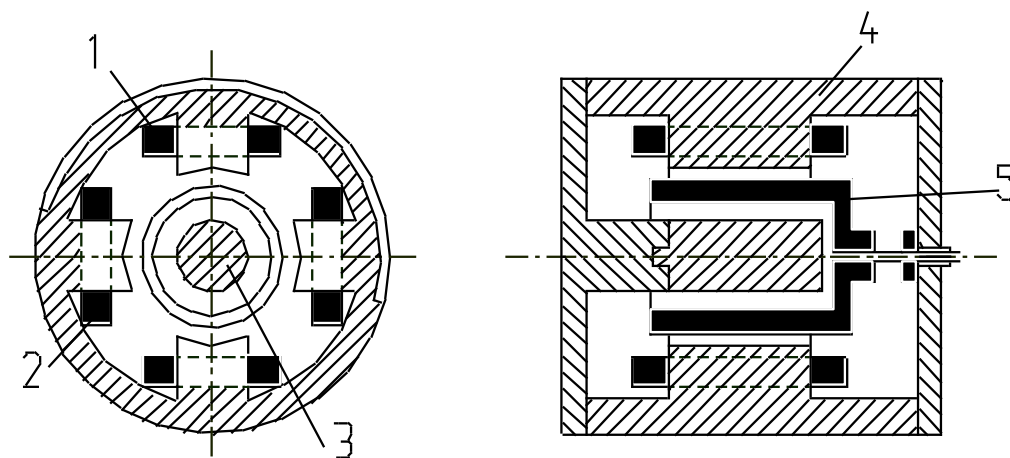
杯形转子通常用铝合金或铜合金制成空心薄壁圆筒，以降低转动惯量。



一、电动机控制系统

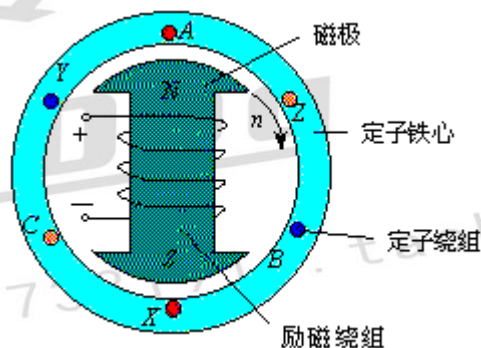
❖ 交流伺服电动机

从结构上，为了减少转动惯量常做成细长形，并且转子导体采用高导电率的铝或黄铜制成。杯形转子通常用铝合金或铜合金制成空心薄壁圆筒，以降低转动惯量。此外空心杯形转子内放置固定的内定子，目的是减少磁路的磁阻。两相异步电动机定子和转子如图所示。杯形转子交流伺服电动机结构，如图所示，绕组、内外定子和转子已经在图中标出。这种电动机在一般的产业中都有应用。



❖ 一、电动机控制系统

■ 交流伺服电动机（永磁同步电机）



每年全世界
需要微电机
15亿台(套)

近10年来，随着**永磁材料技术及相关技术的快速发展**，永磁同步电动机性能得到了快速的提高，与感应电动机和普通同步电动机相比，其控制简单、良好的低速运行性能及较高的性价比等优点使得**永磁无刷同步电动机逐渐成为交流伺服系统执行电动机的主流**。尤其是在高精度、高性能要求的中小功率伺服领域。而交流异步伺服系统仍主要集中在性能要求不高的、大功率伺服领域。

当采用**DSP**构成全数字交流伺服系统时，其所有控制功能可以由软件实现，故有利于提高系统的可靠性，降低系统的成本，并且可以采用先进的现代控制策略，获得更高的控制性能，完成数据存储、故障诊断、故障冗余等功能，使交流伺服系统更趋于智能化。

三大类电动机的综合特性比较表

	机械特性	过载能力	可控性	平稳性	噪声	电磁干扰	维修性	寿命	体积	效率	成本
交流异步电动机	软	小	难	较差	较大	小	易	长	大	低	低
有刷直流电动机	软	大	易	较好	大	严重	难	短	较小	高	较高
永磁同步电动机	硬	大	易	好	小	小	易	长	小	高	较高

一、电动机控制系统

□ 步进电动机

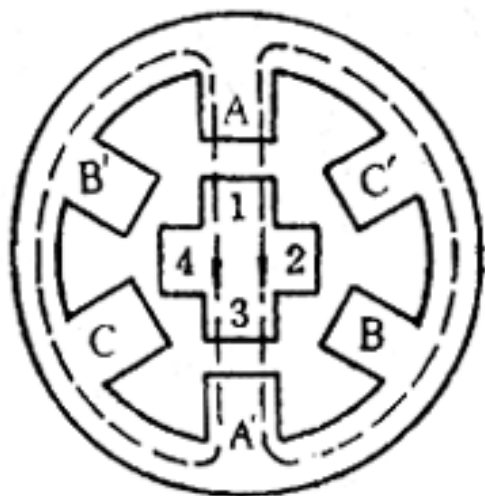


一般电动机都是连续旋转，而**步进电动机却是一步一步转动的，故叫步进电动机**。每输入一个冲信号，该电动机就转过一定的角度（有的步进电动机可以直接输出线位移，称为直线电动机）。因此步进电动机是一种把脉冲变为角度位移（或直线位移）的执行元件。

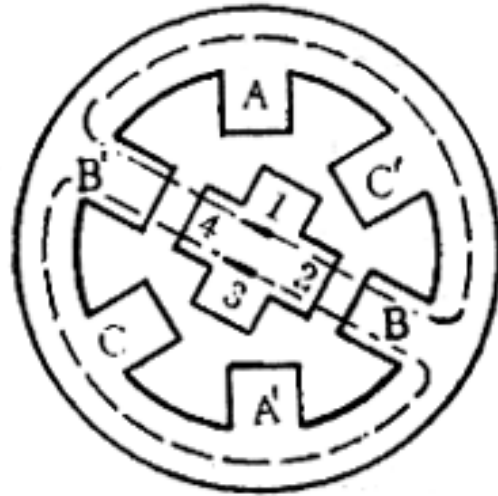
步进电动机的转子为多极分布，定子上嵌有多相星形连接的控制绕组，由专门电源输入电脉冲信号，每**输入一个脉冲信号，步进电动机的转子就前进一步**。由于输入的是脉冲信号，输出的角位移是断续的，所以又称为脉冲电动机。

一、电动机控制系统

□ 步进电动机



(a) A 相通电



(b) B 相通电



(c) C 相通电

由于输入的是脉冲信号，输出的角位移是断续的，所以又称为脉冲电动机。

一、电动机控制系统

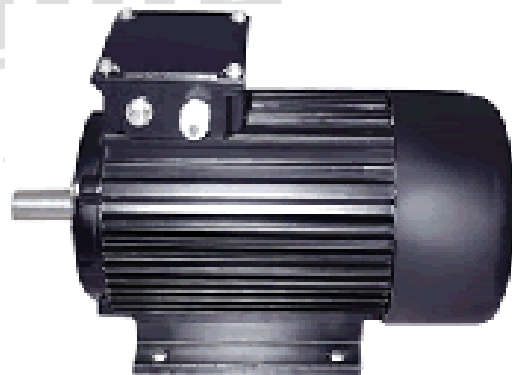
□ 步进电动机

步进电动机广泛应用于：数控车床、数控磨床、数控铣床、线切割机床、电火花加工机床、绣花机、行缝机、包装机械、印刷机械、封切机、纺织机、雕刻机、焊接机械、电梯门机、电动门机、捆钞机、切料机……等等。

❖ 一、电动机控制系统

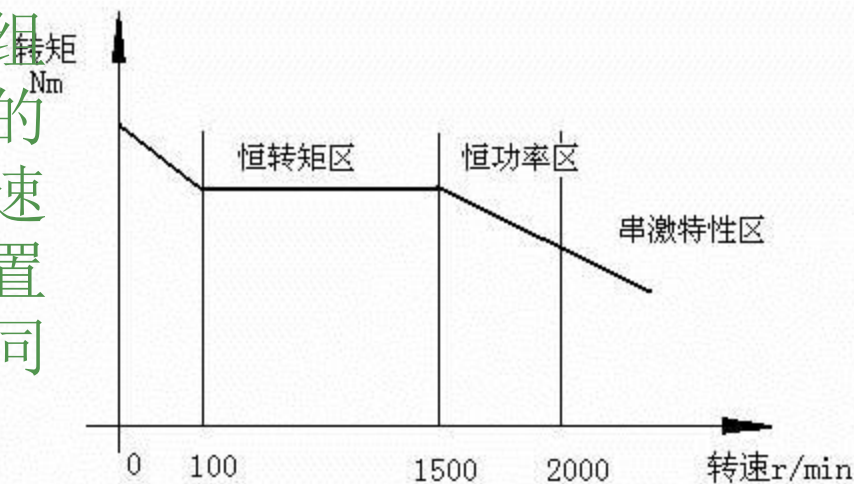
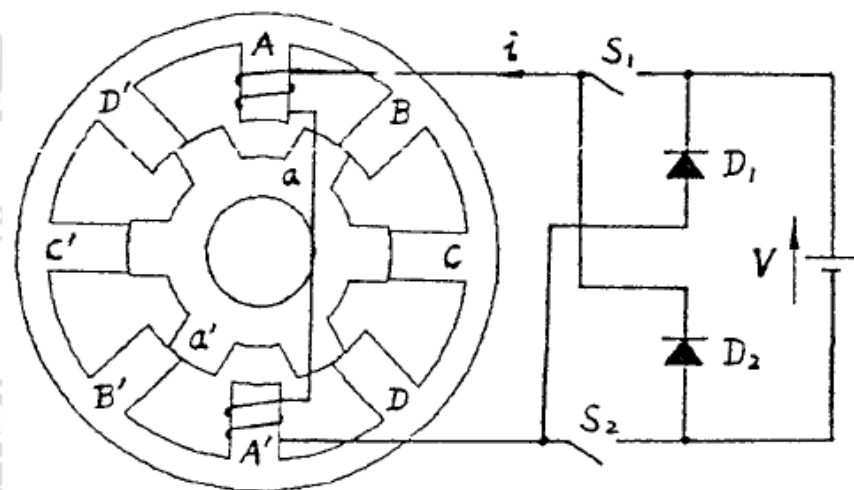
开关磁阻电动机

开关磁阻调速电机(简称SRD)是一种新型交流无级调速系统，有开关磁阻电动机、功率变换器、控制器和位置检测器四部分构成。开关磁阻调速电动机为双凸极结构，转子仅由硅钢片叠压而成，既无绕组也无永磁体，定子各级上绕有集中绕组。



开关磁阻电动机

工作原理遵循“磁阻最小原理”，通电后，磁路有向磁阻最小路径变化的趋势。当转子凸极与定子凸极错位时，气隙大、磁阻大；一旦定子磁极绕组通电，就会形成对转子凸起的磁拉力，使气隙变小——磁路磁阻变小。与此同时用电子开关按一定逻辑关系切换定子磁极绕组的通电相序，即可形成连续旋转的力矩。开关磁阻调速电动机的调速功能是由开关磁阻电动机转子位置检测器、功率变换器和控制器共同配合实现的。



一、电动机控制系统

□ 开关磁阻电动机

同传统的直流及交流电机调速系统比较，具有以下优点：

- 1. 电机结构坚固、制造成本低。**电机结构比直流电机、同步电机、感应电机都坚固，转子无刷、无绕组、无永久磁体，可免维护。电机成本比直流电机、同步电机、感应电机低30%~50%不等，控制器的成本比变频控制器的成本低10%~15%。
- 2. 效率高。**不仅在额定输出状态下有比其它电机调速系统高的效率，而且在宽广的调速范围内也能保持高效率运行。
- 3. 起动转矩大、起动电流小。**适用于对起动和低速性能要求高的传动，如电动车辆等。
- 4. 制动性能好，**能实现再生制动。
- 5. 具有无刷结构，**适合在高粉尘、高速、易燃易爆等恶劣环境下运行。

机电控制系统简介

❖ 一、电动机控制系统

□ 开关磁阻电动机

应用:1、有轨电车、无轨电车、地铁;

2、航空工业, 1995-1998已经在F-16发动机进行试验;

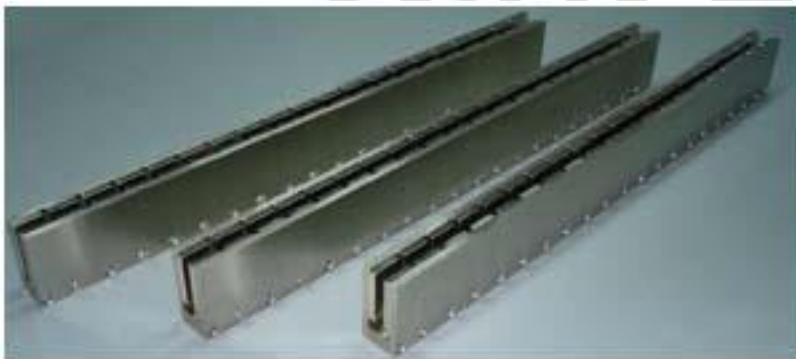
3、家电;

4、机械传动, 如龙门刨床、可逆轧机等;

5、精密伺服系统

一、电动机控制系统

❖ 直线电动机

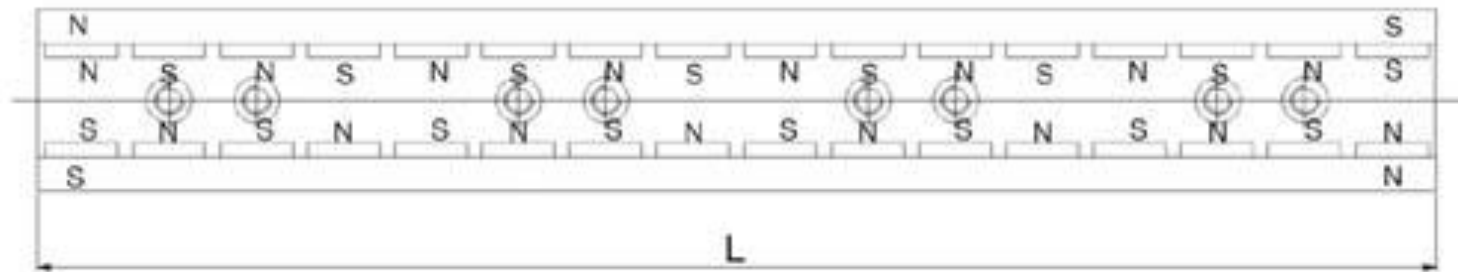


一、电动机控制系统

❖ 直线电动机

直线电机可以认为是旋转电机在结构方面的一种变形，它可以看作是一台旋转电机沿其径向剖开，然后拉平演变而成。近年来，随着对各类自动控制系统的定位精度提出了更高的要求，世界许多国家都在研究、发展和应用直线电机，使得直线电机的应用领域越来越广。

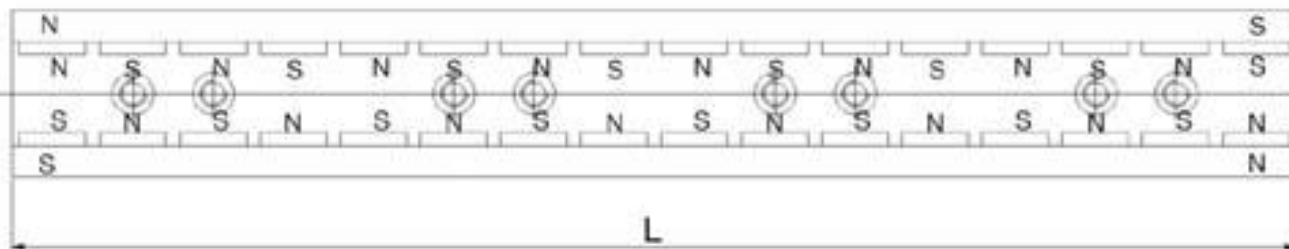
直线电机与旋转电机相比，主要有如下几个特点：**一是结构简单**，由于直线电机不需要把旋转运动变成直线运动的附加装置，因而使得系统本身的结构大为简化，重量和体积大大地下降；



一、电动机控制系统

❖ 直线电动机

二是定位精度高，在需要直线运动的地方，直线电机可以实现直接传动，因而可以消除中间环节所带来的各种定位误差，故定位精度高，如采用微机控制，则还可以大大地提高整个系统的定位精度；**三是反应速度快、灵敏度高，随动性好**。直线电机容易做到其动子用磁悬浮支撑，因而使得动子和定子之间始终保持一定的空气隙而不接触，这就消除了定、动子间的接触摩擦阻力，因而大大地提高了系统的灵敏度、快速性和随动性；**四是工作安全可靠、寿命长**。直线电机可以实现无接触传递力，机械摩擦损耗几乎为零，所以故障少，免维修，因而工作安全可靠、寿命长。



一、电动机控制系统

■ 直线电动机

直线电机主要应用于三个方面：一是应用于自动控制系统，这类应用场合比较多；其次是作为长期连续运行的驱动电机；三是应用在需要短时间、短距离内提供巨大的直线运动能的装置中。

——高速磁悬浮列车 磁悬浮列车是直线电机实际应用的最典型的例子，美、英、日、法、德、加拿大等国都曾经研制直线悬浮列车，其中日本进展最快。

经过十余年的争论，由于高速磁悬浮列车维护成本高，可靠性低，中国高铁发展的是轮轨交通，目前最高时速已达486.1Km/h。



上海浦东机场到地铁龙阳路站距离:29.36公里

<http://shop107331911.taobao.com>

一、电动机控制系统

■ 直线电动机

——直线电机驱动的电梯 世界上第一台使用直线电机驱动的电梯是1990年4月安装于日本东京都关岛区万世大楼，该电梯载重600kg，速度为105m/min，提升高度为22.9m。

由于直线电机驱动的电梯没有曳引机组，因而建筑物顶的机房可省略。如果建筑物的高度增至1000米左右，就必须使用无钢丝绳电梯，这种电梯采用高温超导技术的直线电机驱动，线圈装在井道中，轿厢外装有高性能永磁材料，就如磁悬浮列车一样，采用无线电波或光控技术控制。

一、电动机控制系统

■ 直线电动机

——超高速电动机 在旋转超过某一极限时，采用滚动轴承的电动机就会产生烧结、损坏现象。为此近年来，国外研制了一种直线悬浮电动机（电磁轴承），采用悬浮技术使电机的动子悬浮在空中，消除了动子和定子之间的机械接触和摩擦阻力，其转速可达 $25000 \sim 100000 \text{r/min}$ 以上，因而在高速电动机和高速主轴部件上得到广泛的应用。

如日本安川公司新近研制的多工序自动数控车床用5轴可控式电磁高速主轴采用两个经向电磁轴承和一个轴向推力电磁轴承，可在任意方向上承受机床的负载。在轴的中间，除配有高速电动机以外，还配有与多工序自动数控车床相适应的工具自动交换机构。

一、电动机控制系统

■ 直线电动机



全功能电动手术床

■ 直线电动机



科技部“十五”国家科技攻关计划
直线电机驱动的高速立式加工中心项目



海顿直线电机（常州）有限公司
这款电机外形尺寸仅为**0.8英寸**
21000系列电机有三种设计：贯通轴式，固定轴式，外部驱动式。

机电控制系统简介

■ 超声波电动机

超声波电机与传统的电磁式电机不同，它是利用压电陶瓷的逆压电效应，将超声振动作为动力源的一种新型电机，它由振动部分和移动部分所组成，靠振动部分和移动部分之间的摩擦力来驱动。近二十年来，由于大功率压电陶瓷材料研究的突破，在全世界掀起了超声波电机研究的高潮，相继开发出多种型式的超声波电机。

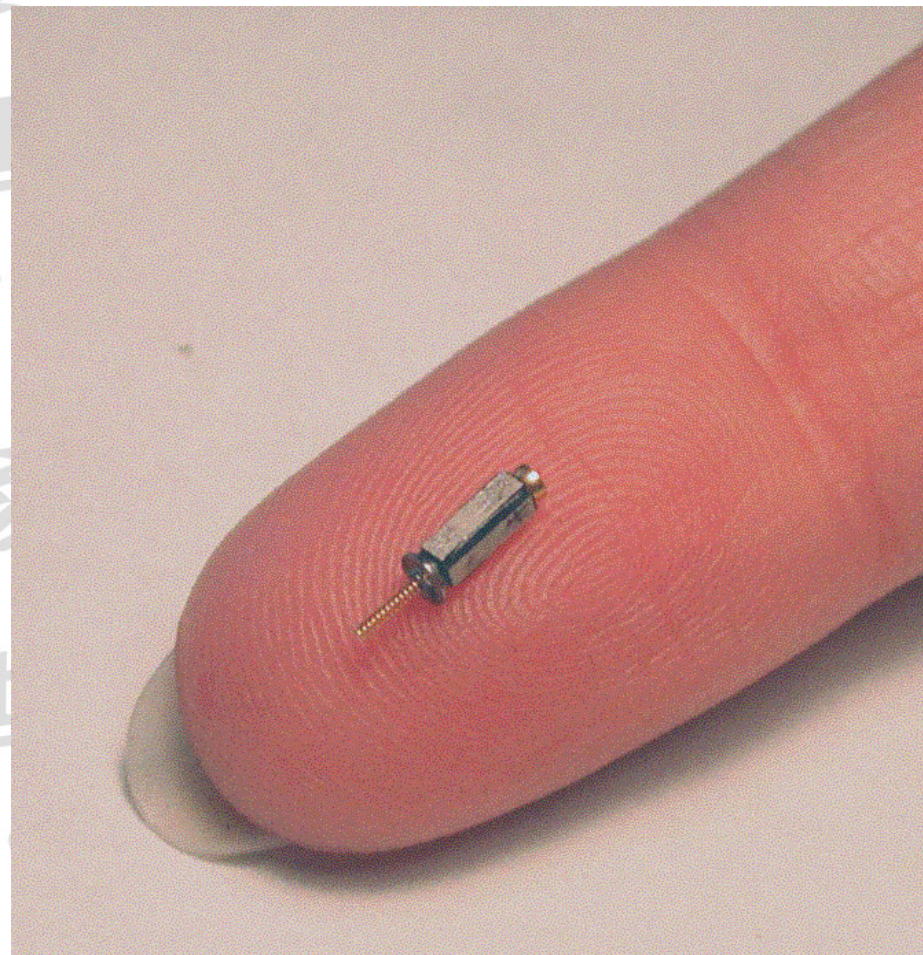
1. 环形行波超声波电机
2. 小型柱体摇摆型超声波电机
3. 步进超声波电机
4. 三自由度球形超声波电机



南京航空航天大学赵淳生院士

■ 超声波电动机

超声波电机具有转速低、转矩大、结构紧凑、体积小、噪声小等优点。该产品已成功地在石油井下精密测试仪器、小卫星、医疗器械、电视摄像和调焦控制等方面配套使用，取得了较好的应用效果。



机电控制系统简介

■ 超声波电动机

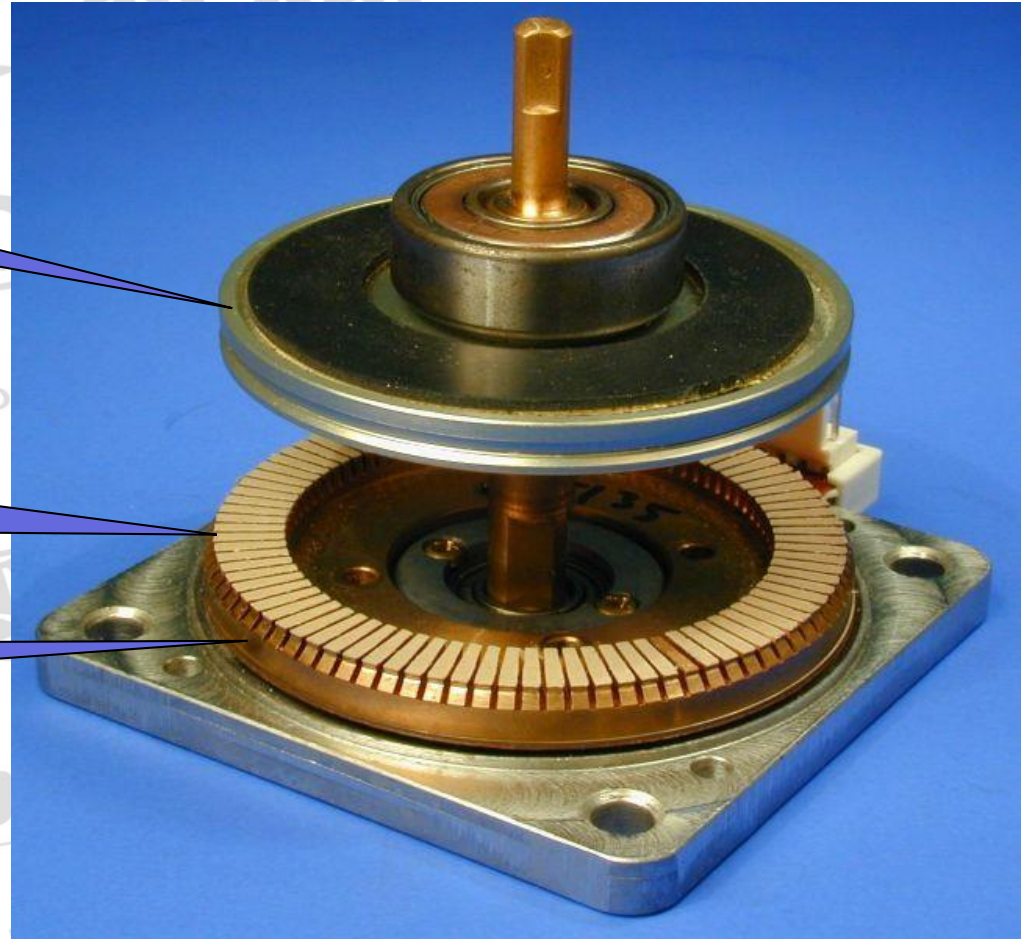
AC

>20KHz

转子

压电陶瓷

定子



利用压电陶瓷的电致伸缩效应把电能转变为弹性体的超声振动，并通过摩擦传动的方式转换为运动体的转动或直线运动。

■ 超声波电动机应用

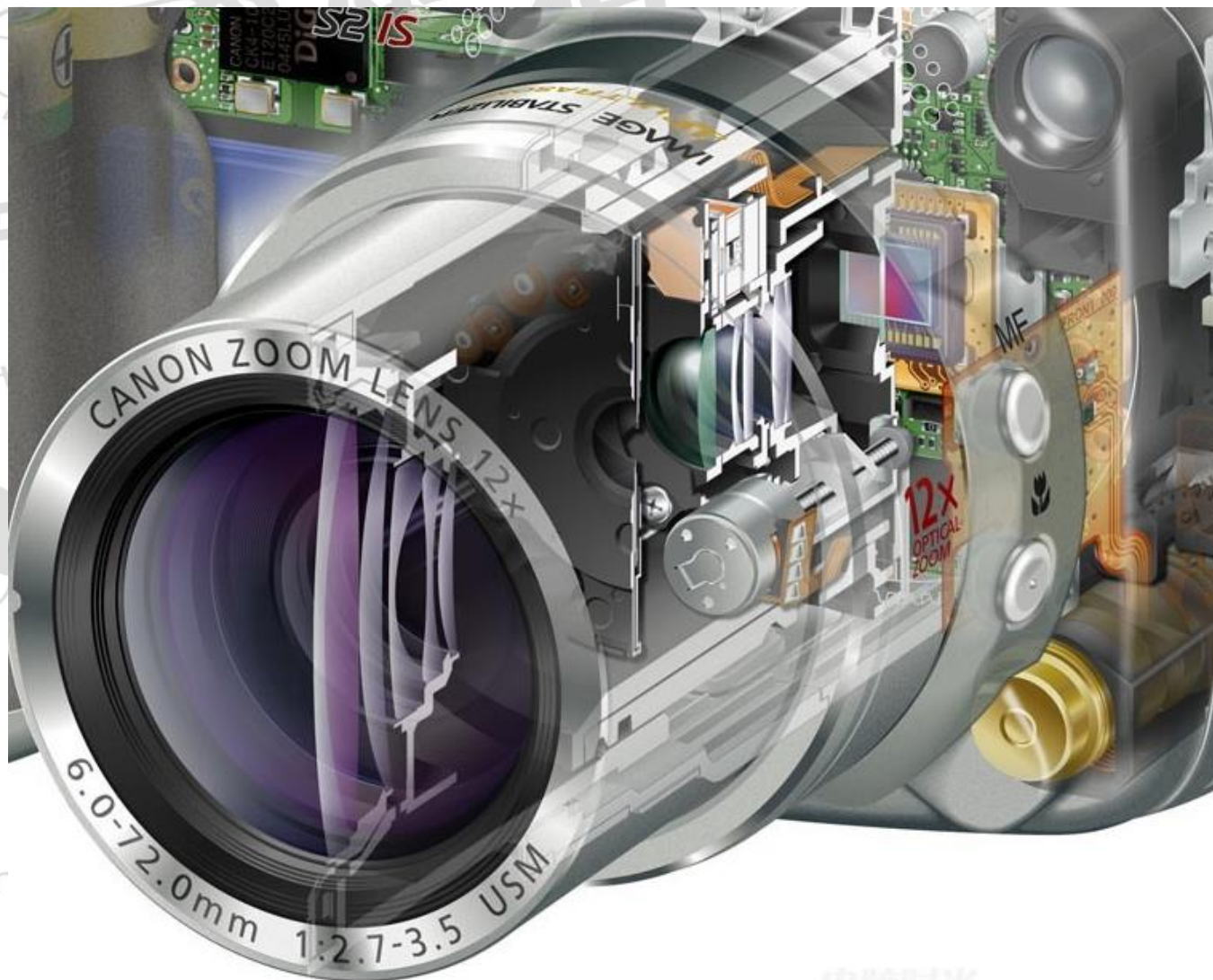
如CANNON公司的EOS620/630相机；

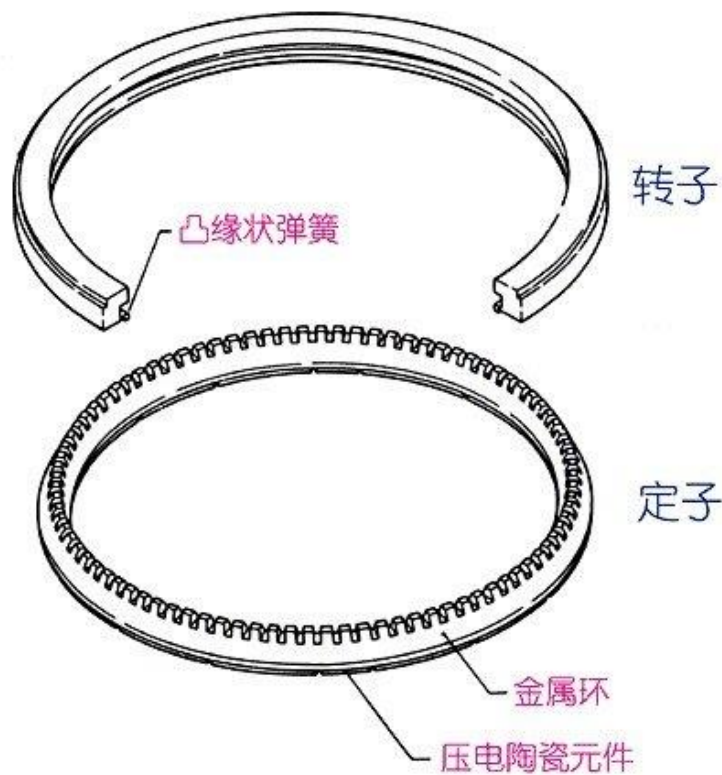
佳能
Power
Shot
S2 IS



■ 超声波电动机应用

佳能 PowerShot S2 IS





超声波电动机应用

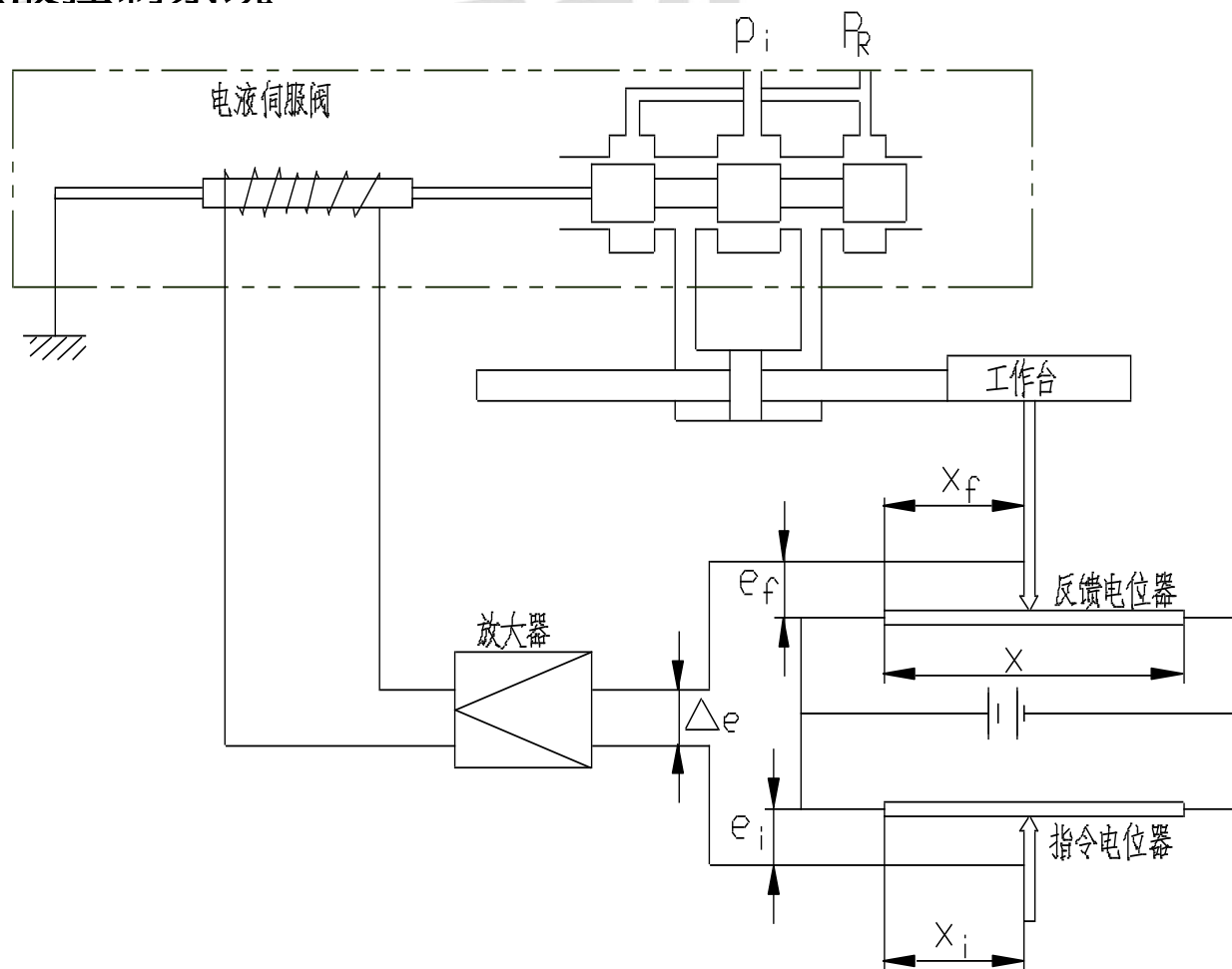
获Nobel奖的扫描隧道显微镜；



火星探测器核弹
头、机器人、微
型机械等等。

机电控制系统简介

❖ 二、电液控制系统



4.4.1 直流电机

- ❖ 直流励磁的磁路在电工设备中的应用，除了直流电磁铁（直流继电器、直流接触器等）外，最重要的就是应用在直流旋转电机中。在发电厂里，同步发电机的励磁机、蓄电池的充电机等，都是直流发电机。
- ❖ **直流发电机**通常是作为直流电源，向负载输出电能；**直流电动机**则是作为原动机带动各种生产机械工作，向负载输出机械能。
- ❖ 直流电机包括**有刷电机**、**无刷电机**、**步进电机**等种类，它们的原理都基本相同，都是利用电和磁的相互作用来实现机械能与电能的相互转换。

4.4.1 直流电机

- ❖ 通常线圈转子都是绕在铁芯上的。也有没有铁芯，线圈本身做成杯状，励磁装置（永磁体）做成柱状放置在转子的内部的电动机，称为“**空心杯电动机**”。
- ❖ 但也有线圈固定不动，励磁装置旋转的，称为**外转子电机**。许多电动模型上使用的大功率无刷电动机即为外转子电机。**其好处是惯量较大，运转平稳，并且由于外壳旋转，容易实现更好的散热性能。**

4.4.1 直流电机



外转子无刷电机应用在航模上，可达千瓦级输出

4.4.1 直流电机

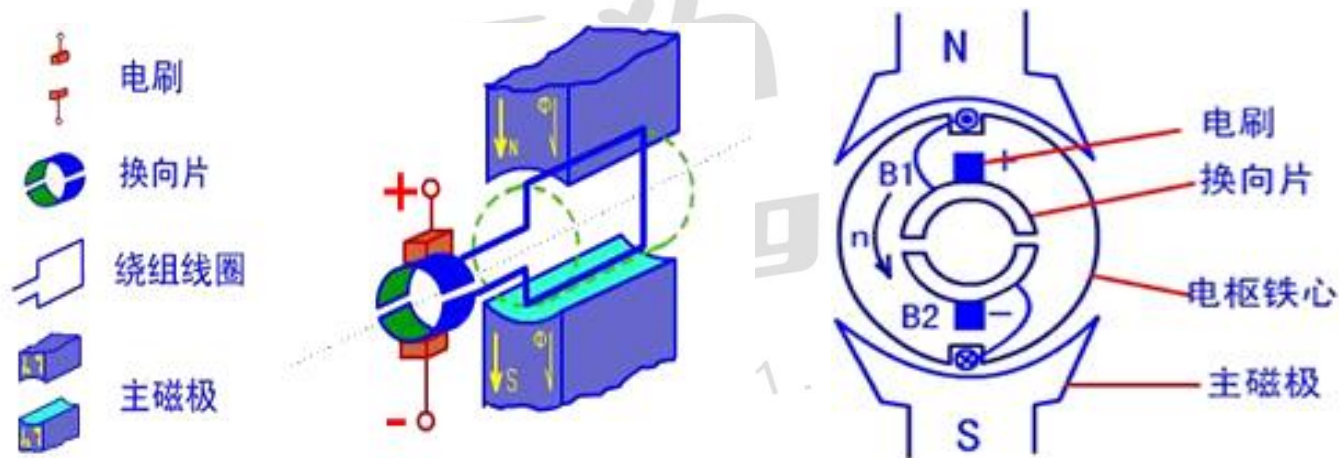


外转子无刷电机应用在光驱上

4.4.1 直流电机

- ❖ 这里仅仅对直流有刷电机的运行原理作一个简单的介绍，有关直流有刷电机的详细知识，请参阅《电机拖动》、《电动机的单片机控制》等专业教材。
- ❖ 直流电机由**定子和转子**两大部分组成，定子上有磁极（绕组式或永磁式），转子有绕组，通电后，转子上也形成磁场（磁极），定子和转子的磁极之间有一个夹角，在定转子磁场（**N**极和**S**极之间）的相互吸引下，于是电机旋转。
- ❖ 直流励磁的磁路在电工设备中的应用，除了直流电磁铁（直流继电器、直流接触器等）外，最重要的就是应用在直流旋转电机中。

4.4.1 直流电机



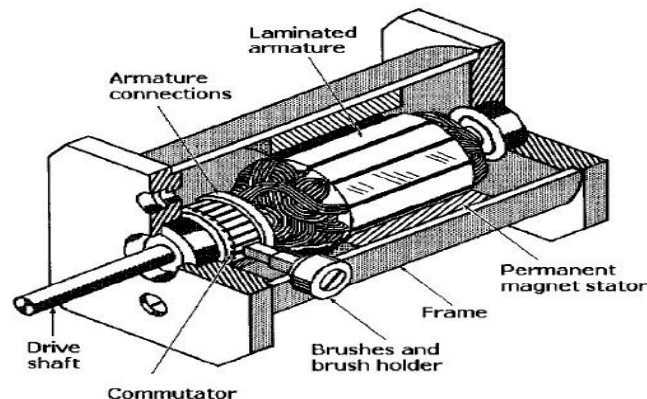
上图表示一台最简单的两极直流电机模型。其中固定部分有磁铁，这里称作主磁极；固定部分还有电刷。转动部分有环形铁心和绕在环形铁心上的绕组。它的固定部分（定子）上，装设了一对直流励磁的静止的主磁极n和s，在旋转部分（转子）上装设电枢铁心。定子与转子之间有一气隙。

4.4.1 直流电机

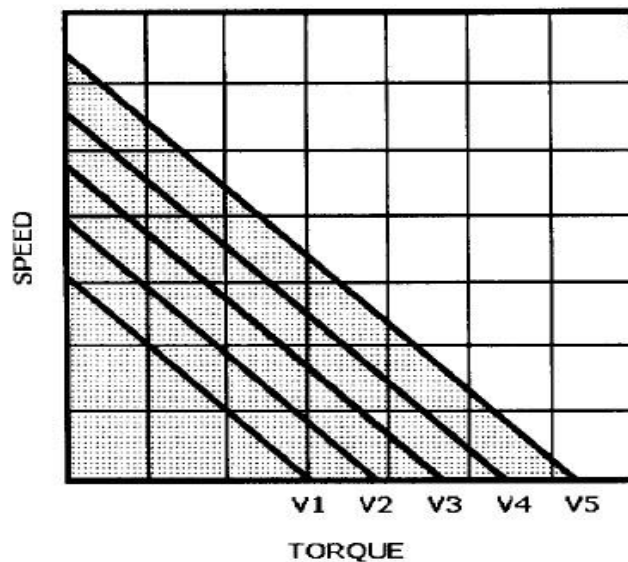
- ❖ 在发电厂里，同步发电机的励磁机、蓄电池的充电机等，都是**直流发电机**；锅炉给粉机的原动机是直流电动机。此外，在许多工业部门，例如大型轧钢设备、大型精密机床、矿井卷扬机、市内电车、电缆设备要求严格线速度一致的地方等，通常都采用直流电动机作为原动机来拖动工作机械的。
- ❖ 直流发电机通常是作为直流电源，向负载输出电能；直流电动机则是作为原动机带动各种生产机械工作，向负载输出机械能。
- ❖ 在控制系统中，直流电机还有其它的用途，例如**测速电机、伺服电机**等。

4.4.1 直流电机

上面仅仅是一个理论上的直流有刷电机模型。实际的直流有刷电机结构如右图所示：



直流有刷电机的转速是与电压成正比的，而转矩是与电流成正比的。对于同一台直流有刷电机，电压、电流、转矩这三者之间的关系大致可以用下图来表示：



4.4.1 直流电机

- ❖ 其中**V1~V5**代表**5**个不同的电压，**V1**最低，**V5**最高。可以看到，在相同的电压下，速度越低，转矩越大；在相同的转矩下，电压越高，速度越大；在相同的速度下，电压越高，转矩越大。
- ❖ 但是电压并非越高越好。一般直流电机是额定电压从**3V~24V**。再大一些是**30V**或更大。“未来之星”机器人使用的电机工作在**11~12V**。不能让你的额定**6V**的电机工作在**100V**，那样就可能会损坏电机了。直流电机在额定电压下工作效率最高。如果电压值过低，它就不会工作；如果电压过高，它将过热，线圈将会熔化。因此一般尽可能采用接近电机额定的电压。

4.4.1 直流电机

- ❖ 电流
- ❖ 对于所有的电路来说，一定注意到电流。
- ❖ **额定工作电流**。这是电机工作在预期一般转矩时电流的平均值，该值乘以额定电压就得到电机运行的平均功率。
- ❖ **堵转电流**。这是电机工作的最大电流，因而也是最大功率。所以你设计好全部的电路，能处理这样的停转电流。此外，如果你打算长时间运转电机，或者在高出额定电压时运行，最好给电机加上**散热槽**避免线圈熔化。

$$U = I \times R + \zeta$$

U ——端电压

I ——线圈电流

R ——内阻

ζ ——反电动势

4.4.1 直流电机

❖ FAULHABER 2342 12CR型号电机



项目	数据	说明
额定电压	12VDC	
额定电流	1.5A	工作在 12V
标称功率	17W	工作在 12V
减速器	行星齿轮减速器	减速比 63:1
空载输出转速	120rpm	工作在 12V
空载电流	0.15A	工作在 12V
重量	140g	
尺寸	D32mm,L70mm	最大尺寸

直流有刷电机的最大弱点就是有电流的**换向问题**，消耗有色金属或石墨较多，成本高，运行中的维护检修也比较麻烦。因此，电机制造业中正在努力改善交流电动机、无刷电机的性能，并且大量代替直流有刷电机。但是在移动机器人等场合，直流有刷电机由于其功率密度大、尺寸小、控制相对简单、不需要交流电等优点，仍然被大量使用。

4.4.1 直流电机

下面是市场上容易买到的几种普通直流电机性能和供参考的价格、联系方式：

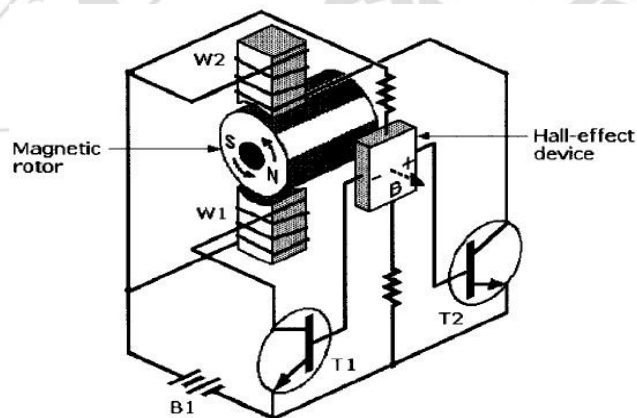
恒达电机制造有限公司，东莞 0769-87680601-827 	主要生产各种尺寸的微电机,从130的微电机到770的重型电机。该公司的电机产品丰富，价格低廉。也能提供带有减速箱的各种电机。主要用于家电产品，其130~930系列的电机也适合制作廉价机器人使用。
北京勇光高特微电机有限公司 010-83930553 	主要生产力矩电机。其特点是直径40~200mm，功率20~400W。转速低（空载100~2000RPM），力矩大，可以堵转。对于制作移动机器人的驱动轮或者履带式不错的选择。
慈溪市中大电机厂 www.zd-motor.com	提供各种微型电机，均可配备减速机。该厂生产的直流电机和减速机质量不错，但是价格稍贵。
其它	另外，拆卸玩具电动车、废旧打印机等设备也可以获得各种尺寸的微电机。

4.4.1 直流电机

直流无刷电机:

- ❖ 有刷直流电动机具有非常优秀的机械特性、宽调速范围、大启动转矩、简单的控制电路等优点，长期以来一直广泛的应用在各种驱动装置和伺服系统中。
- ❖ 但是这种电动机的电刷和换向器却成为阻碍它发展的障碍。机械电刷和换向器因为**强迫性接触，造成它结构复、可靠性差、变化的接触电阻、火花、噪音**等一系列问题，影响了直流电动机的调速性能和精度。
- ❖ 交流电机没有碳刷及整流子，免维护、坚固、应用广，但特性上若要达到相当于直流电机的性能须用复杂控制技术才能达到。

直流无刷电机的原理如下图所示：



无刷电机将绕组（上图W1，W2）作为定子，而永久磁铁（上图S/N）作为转子。不再采用电刷作为换向装置，而是用霍尔传感器(Hall-effect device)作为换向检测元件，通过晶体管的放大，来实现电流换向功能。

无刷电机的断面原理示意图如下图所示，结构上与有刷电机正好相反。无刷电机采用电子换向器切换绕组的通电顺序，产生旋转磁场，从而推动永磁体转子做旋转运动。

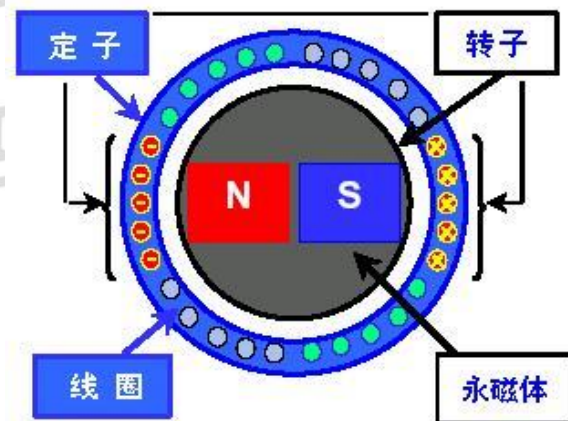
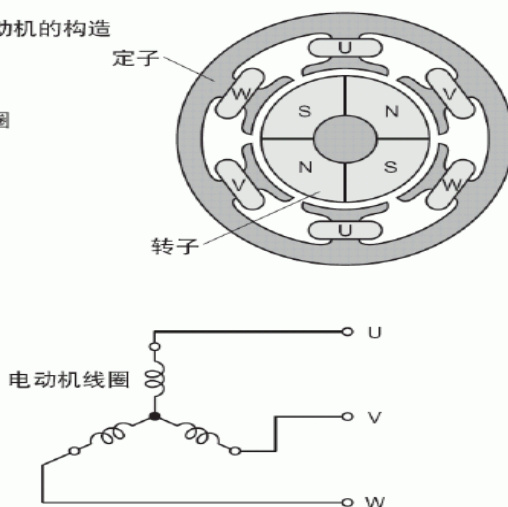
无刷直流电动机的构造

U=U相线圈

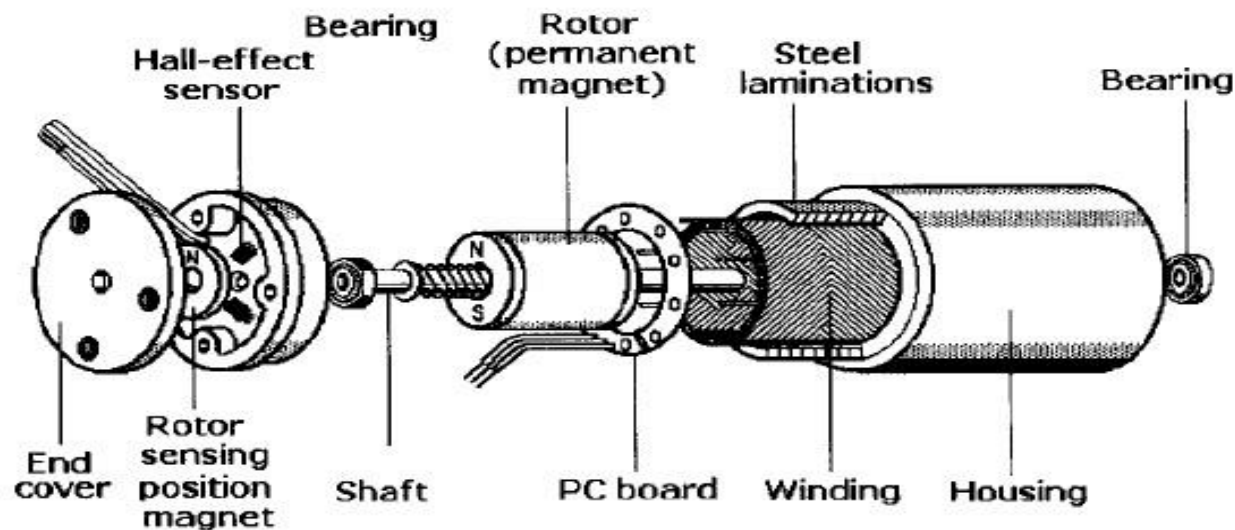
V=V相线圈

W=W相线圈

转子=磁钢



典型的直流无刷电机结构



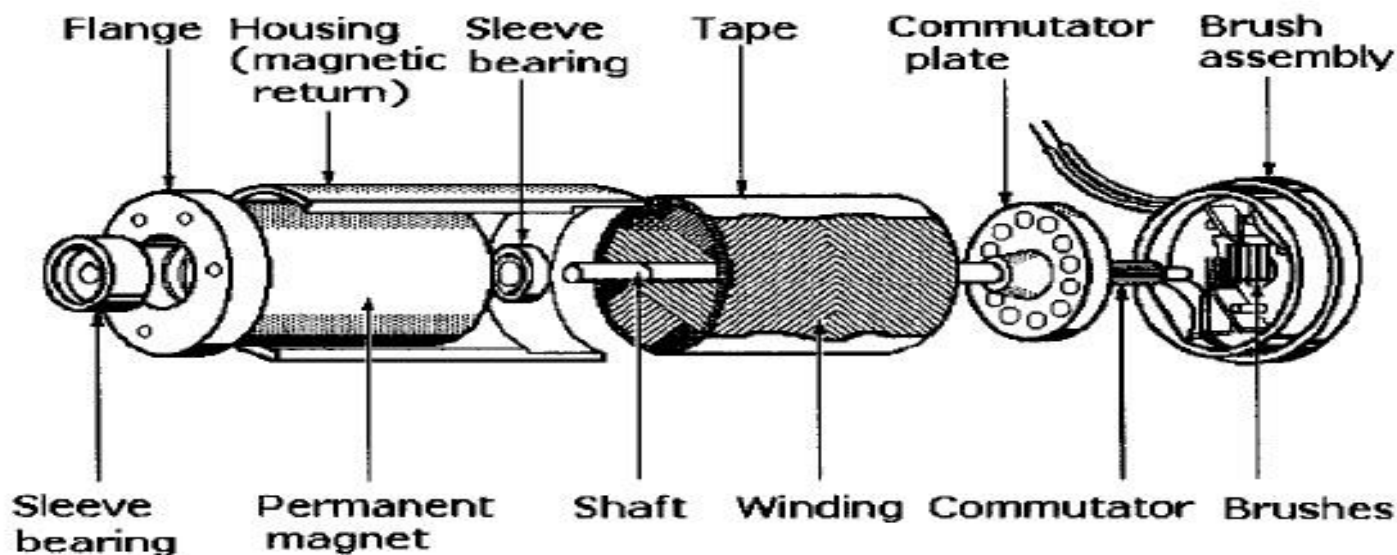
直流无刷电动机的出现，利用电子换向器代替了机械电刷和机械换向器，因此，使这种电动机不仅保留了直流电动机的优点，而且又具有了交流电动机的结构简单、运行可靠、维护方便等优点，使它一经出现就已极快的速度发展和普及。但是，由于电子换向器较为复杂，通常尺寸也较机械式换向器大，加上控制较为复杂（通常无法做到一通电就工作），因此在要求功率大、体积小、结构简单的场合，无刷直流电机还是无法取代有刷电机。

4.4.1直流电机

航模用无刷电机 	通常用于航空模型的桨叶驱动，体积小，重量轻，功率很大。直径30mm的外转子无刷电机的功率可以达到300-400W。但是这些电机的转速很高，通常在10000RPM以上，如果负载太大、转速太低的话非常容易烧毁。适合用来驱动风扇、气垫船等设备。
MAXON Motor A.G. www.maxonmotor.com.cn 	高性能、高质量的空心杯无刷电机，以及完整系列配套的减速机、编码器和无刷伺服驱动器。价格较贵。一只150W的无刷电机价格约为人民币3000元以上。适合用在机器人的关键部位。其中国公司为苏州钧和，注意其电机一般需要订货，订货周期通常为6~8周。
Faulhaber 无刷电机 www.bjxdh.com.cn	Faulhaber集团是空心杯电机的发明者，也是世界最大的空心杯电机供应商。该公司生产的无刷电机可提供媲美MAXON的性能和价格。北京众志恒公司为其中国代理商,但是比较缺乏技术和维修能力。
和利时电机 http://www.stone-electric.com 	原四通电机。该公司同时提供无刷电机和无刷驱动器。

空心杯直流电机

- ❖ 空心杯直流电机属于直流永磁电机，与普通有刷、无刷直流电机的主要区别采用是无铁芯转子，也叫空心杯型转子。该转子是直接采用导线绕制成的，没有任何其他的结构支撑这些绕线，绕线本身做成杯状，就构成了转子的结构。空心杯直流电机的结构示意图如下：



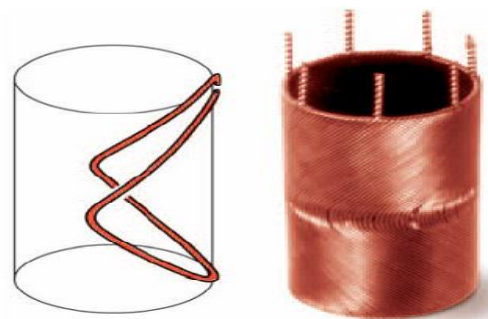
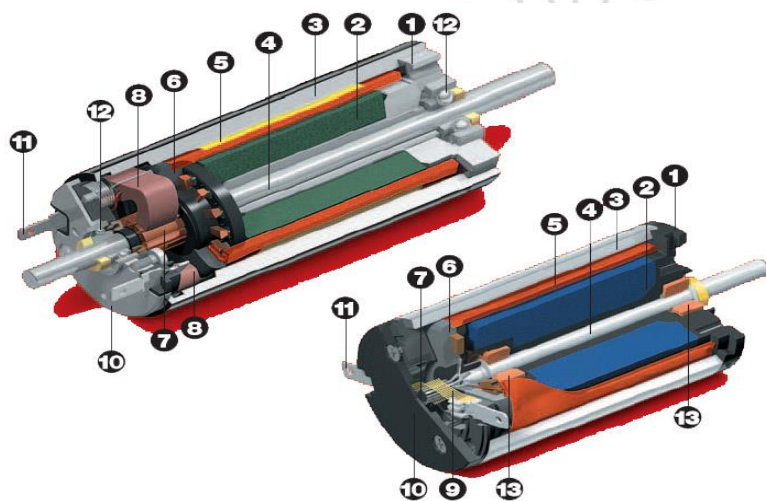
4.4.1 直流电机

❖ 空心杯电动机具有以下优势：

- ❖ **1、**由于没有铁芯，极大地降低了铁损（电涡流效应造成的铁心内感应电流和发热产生的损耗）。最大的能量转换效率（衡量其节能特性的指标）：其效率一般在**70%**以上，部分产品可达到**90%**以上（普通铁芯电机在**15-50%**）；
- ❖ **2、**激活、制动迅速，响应极快：机械时间常数小于**28**毫秒，部分产品可以达到**10**毫秒以内，在推荐运行区域内的高速运转状态下，转速调节灵敏；
- ❖ **3、**可靠的运行稳定性：自适应能力强，自身转速波动能控制在**2%**以内；
- ❖ **4、**电磁干扰少：采用高品质的电刷、换向器结构，换向火花小，可以免去附加的抗干扰装置；
- ❖ **5、**能量密度大：与同等功率的铁芯电机相比，其重量、体积减轻**1/3-1/2**；转速-电压、转速-转矩、转矩-电流等对应参数都呈现标准的线性关系。

4.4.1 直流电机

- ❖ 空心杯技术是一种转子的工艺和绕线技术，因此可以用于直流有刷电机和无刷电机。下图是一个典型的有刷空心杯电机的剖面示意图（瑞士**MAXON Motor A.G.**的典型空心杯电机），以及空心杯转子绕组的实物照片。



4.4.1 直流电机

空心杯直流电机普遍价格较高。国内常见的电机性能和价格、供货商联系方式如下：

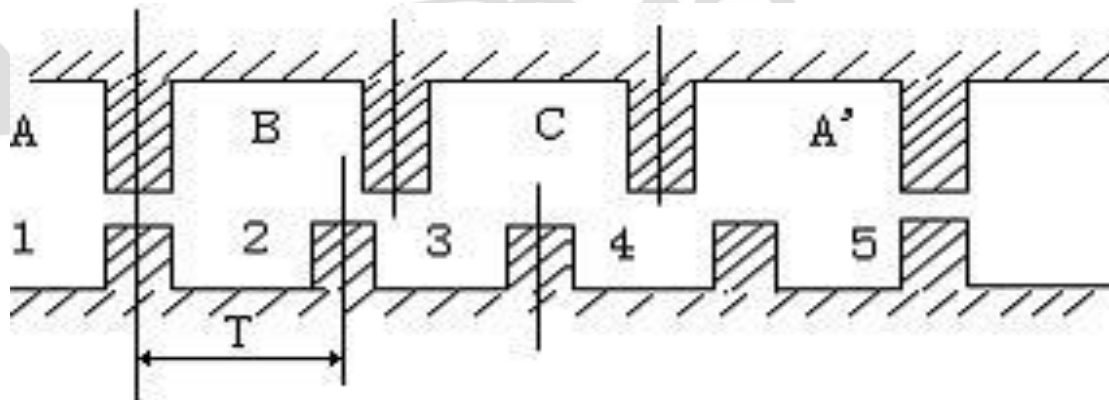
MAXON Motor A.G. www.maxonmotor.com.cn 	高性能，高价格。 其32mm直径的电机具有额定60W的功率，35mm直径的电机具有额定90W的功率。但是电机单价基本在2000RMB以上。最大功率的电机为75mm直径，250W 由于功率密度很大，比较容易发热烧毁。只要注意散热，该品牌的电机性能非常可靠。
Faulhaber 电机 www.bjxdh.com.cn	高性能，高价格。 38mm直径的电机最大功率可达到200W。同样需要严格注意散热。
北京博创 SAEG series http://robot.up-tech.com/	北京博创提供的SAEG系列空心杯直流有刷电机具有接近MAXON品牌的性能和较低的价格。同时也可以提供直流伺服驱动器。38mm直径的SAEG系列电机额定功率为90W。
北京奕山 http://www.e-ds.cn	北京奕山提供中小功率的空心杯直流有刷电机，直径16-36mm，功率0.3~40W。价格较低，性能也不错。

4.4.2 步进电机

- ❖ 步进电机是将电脉冲信号转变为角位移或线位移的开环控制元件。
- ❖ 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，即给电机加一个脉冲信号，电机则转过一个步距角。
- ❖ 这一线性关系的存在，加上步进电机只有周期性的误差而无累积误差等特点。使得在速度、位置等控制领域用步进电机来控制变的非常的简单。
- ❖ 它必须由双环形脉冲信号、功率驱动电路等组成控制系统方可使用。

4.4.2步进电机

- ❖ 如下图所示，电机转子均匀分布着很多小齿，定子齿有三个励磁绕组，其几何轴线依次分别与转子齿轴线错开。 0 、 $1/3\tau$ 、 $2/3\tau$ ，（相邻两转子齿轴线间的距离为齿距以 τ 表示），即A与齿1相对齐，B与齿2向右错开 $1/3\tau$ ，C与齿3向右错开 $2/3\tau$ ，A'与齿5相对齐，（A'就是A，齿5就是齿1）



4.4.2步进电机

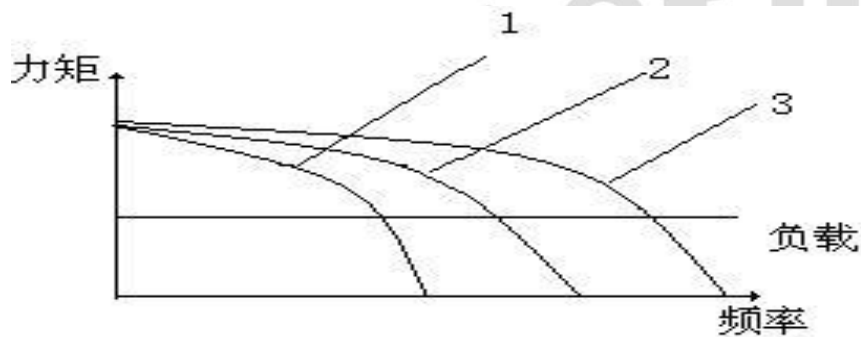
如A相通电, B, C相不通电时, 由于磁场作用, 齿1与A对齐, (转子不受任何力以下均同)。如B相通电, A, C相不通电时, 齿2应与B对齐, 此时转子向右移过 $1/3\tau$, 此时齿3与C偏移为 $1/3\tau$, 齿4与A偏移($\tau - 1/3\tau$) = $2/3\tau$ 。如C相通电, A, B相不通电, 齿3应与C对齐, 此时转子又向右移过 $1/3\tau$, 此时齿4与A偏移为 $1/3\tau$ 对齐。如A相通电, B, C相不通电, 齿4与A对齐, 转子又向右移过 $1/3\tau$ 这样经过A、B、C、A分别通电状态, 齿4 (即齿1前一齿)移到A相, 电机转子向右转过一个齿距, 如果不断地按A, B, C, A.....通电, 电机就每步(每脉冲) $1/3\tau$, 向右旋转。如按A, C, B, A.....通电, 电机就反转。由此可见: 电机的位置和速度由导电次数(脉冲数)和频率成一一对应关系。而方向由导电顺序决定。

4.4.2 步进电机

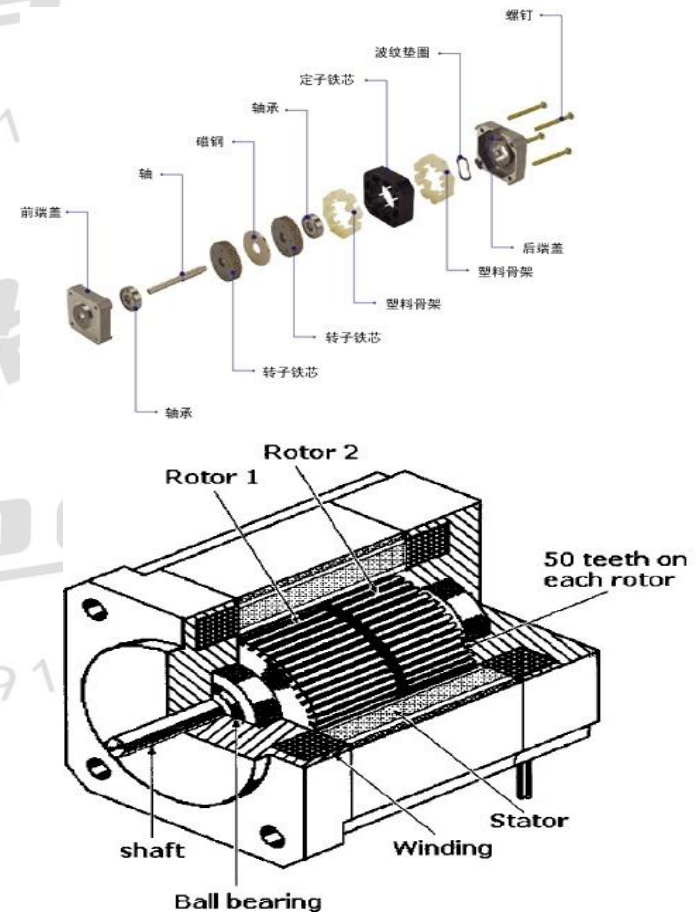
- ❖ 不过，出于对力矩、平稳、噪音及减少角度等方面考虑。往往采用**A-AB-B-BC-C-CA-A**这种导电状态，这样将原来每步 $1/3$ 改变为 $1/6$ 。甚至于通过二相电流不同的组合，使其 $1/3$ 变为 $1/12$ ， $1/24$ ，这就是电机细分驱动的基本理论依据。不难推出：电机定子上有 m 相励磁绕组，其轴线分别与转子齿轴线偏移 $1/m, 2/m, \dots, (m-1)/m, 1$ 。并且导电按一定的相序电机就能正反转被控制——这是步进电机旋转的物理条件。只要符合这一条件我们理论上可以制造任何相的步进电机，出于成本等多方面考虑，市场上一般以二、三、四、五相为多。
- ❖ 步进电机的力矩：电机一旦通电，在定转子间将产生磁场（磁通量 Φ ）当转子与定子错开一定角度产生力 F 与 $(d\Phi/d\theta)$ 成正比。其磁通量 $\Phi = B_r \cdot S$ B_r 为磁密， S 为导磁面积 F 与 $L \cdot D \cdot B_r$ 成正比 L 为铁芯有效长度， D 为转子直径 $B_r = N \cdot I / R$ $N \cdot I$ 为励磁绕组安匝数（电流乘匝数） R 为磁阻。力矩=力*半径力矩与电机有效体积*安匝数*磁密 成正比（只考虑线性状态）因此，电机有效体积越大，励磁安匝数越大，定转子间气隙越小，电机力矩越大，反之亦然。

4.4.2 步进电机

- ❖ 电机的动态力矩取决于电机运行时的平均电流（而非静态电流），平均电流越大，电机输出力矩越大，即电机的频率特性越硬。如下图所示：



其中，曲线3电流最大、或电压最高；曲线1电流最小、或电压最低，曲线与负载的交点为负载的最大速度点。要使平均电流大，尽可能提高驱动电压，使采用小电感大电流的电机。以下是一张简明的感应子式步进电机的结构图。



4.4.2步进电机

- ❖ **A)**在负载合适、控制合适的前提下，步进电机的角位移与输入脉冲数严格的成正比，因此，当它转一转后，没有累计误差，具有良好的跟随性。
- ❖ **B)**由步进电机与驱动电路组成的开环数控系统，既非常简单、廉价、又非常可靠。同时，它也可以与角度反馈环节组成高性能的闭环数控系统。
- ❖ **C)**步进电机的动态响应快，易于起停，正反转和变速。
- ❖ **D)**速度可以在相当大的范围内平滑调节，低速下仍能保证比较大的转矩，因此，一般可以不用减速器而直接驱动负载。

4.4.2 步进电机的缺点

- ❖ **E)** 步进电机只能通过脉冲电源供电才能运行，它不能直接使用交流电源和直流电源。
- ❖ **F)** 当负载较大、冲击负载、或者控制不合适的情况下，步进电机存在震荡和失步的现象，必须对控制系统和机械负载采取相应的措施。
- ❖ **G)** 步进电动机自身的噪声和振动较大，带惯性负载的能力较差。

4.4.2步进电机

市场上容易买到的几种直流电机性能和价格、供货商联系方式如下：

美国丹纳赫传动 http://www.danahermotion.com.cn/	该公司提供大量型号、不同性能的步进电机，从经济型到高性能，性能可靠，但是价格较高。
北京和利时电机技术有限公司 www.hollysys-electric.com 	该公司的步进电机性能可靠，价格不算贵。
	从废旧的喷墨打印机、针式打印机上通常能拆下多个步进电机。这类电机通常功率在0.3-2W，多数还带有涡轮蜗杆减速器或者丝杠螺母传动装置，适合制作小型机器人。 拆卸旧式的3.5寸、5寸软盘驱动器，也可以获得小型的步进电机。

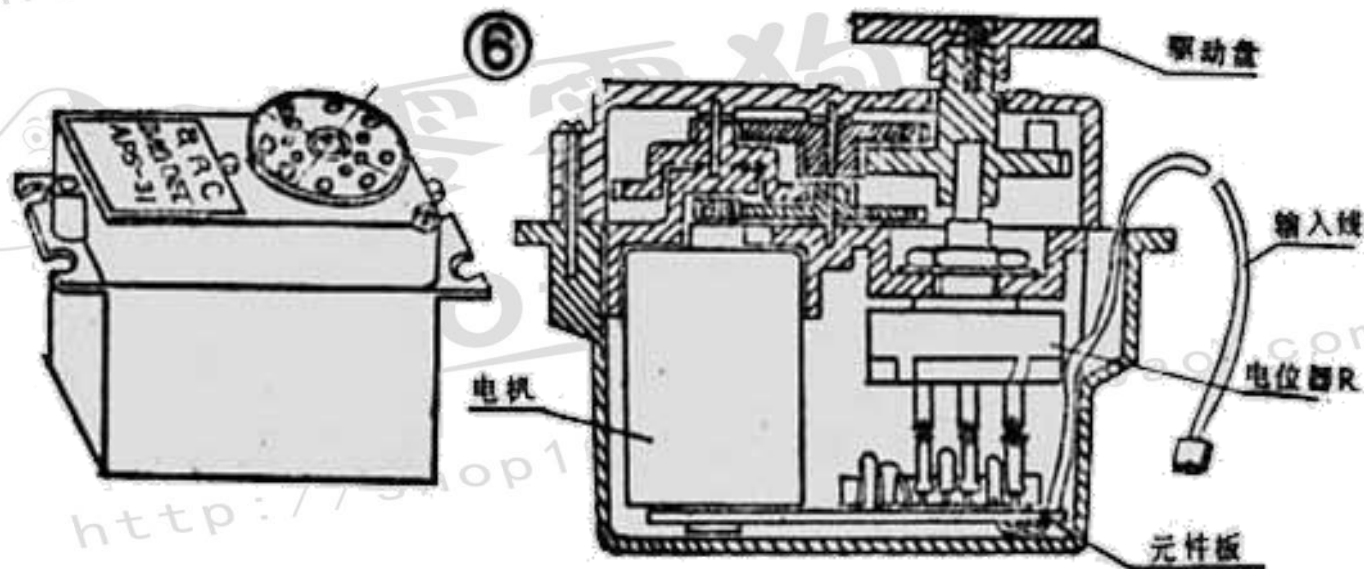
4.4.3舵机

- ❖ 舵机，顾名思义是控制舵面的电动机。舵机的出现最早是作为遥控模型控制舵面、油门等机构的动力来源，但是由于舵机具有很多优秀的特性，在制作机器人时也时常能看到它的应用。
- ❖ 一种集成了位置控制器、功率驱动、伺服电机和角度传感的机电一体化执行元件，具有重量轻，微小型化，成本低廉且有一定精度。



4.4.3 舵机

- ❖ 一般来讲，舵机主要由以下几个部分组成，
舵盘、减速齿轮组、位置反馈电位计**5k**、
直流电机、控制电路板等。



4.4.3舵机

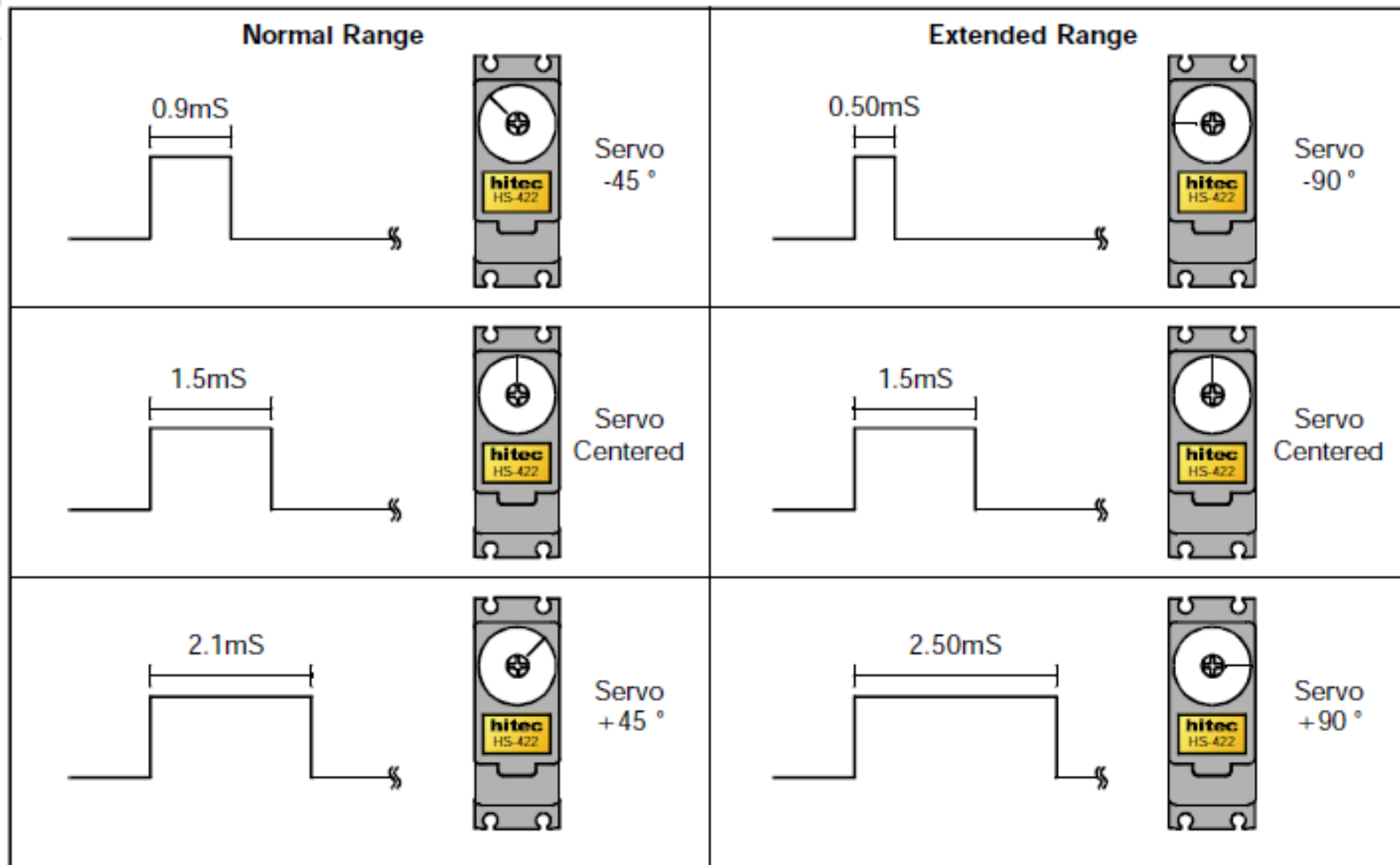
舵机的输入线共有三条，红色中间，是电源线，一边黑色的是地线，这两根线给舵机提供最基本的能源保证，主要是电机的转动消耗。电源有两种规格，一是**4.8V**，一是**6.0V**，分别对应不同的转矩标准；另外一根线是控制信号线，**Futaba**的一般为白色，**JR**的一般为桔黄色。

4.4.3舵机

舵机的控制信号为周期是**20ms**的脉宽位置调制（**PPM**）信号，其中脉冲宽度通常从**0.5ms-2.5ms**（也有少量型号的脉冲宽度范围不一样。例如下图中所示，为**1.25ms~1.75ms**），相对应输出轴的位置为**0—180度**，呈线性变化。也就是说，给控制引脚提供一定的脉宽（**TTL电平，0V/5V**），它的输出轴就会保持在一个相对应的角度上，无论外界转矩怎样改变，直到给它提供一个另外宽度的脉冲信号，它才会改变输出角度到新的对应的位置上。

4.4.3舵机

❖ 伺服舵机定位控制



4.4.3舵机

定位控制原理:

- ❖ 控制信号由接收机的通道进入信号调制芯片，获得直流偏置电压。它内部有一个基准电路，产生周期为**20ms**，宽度为**1.5ms**的基准信号，将获得的直流偏置电压与电位器的电压比较，获得电压差输出。最后，电压差的正负输出到电机驱动芯片决定电机的正反转。当电机转速一定时，通过级联减速齿轮带动电位器旋转，使得电压差为**0**，电机停止转动。

4.4.3舵机

- ❖ 舵机的工作电压一般为**4.8V**或**6V**，转速一般为**0.22秒/60度**或**0.18秒/60度**，所以假如你更改角度控制脉冲的宽度太快时，舵机可能反应不过来。
- ❖ 一般舵机的位置等级有**1024**个，那么，如果舵机的有效角度范围为**180度**的话，其控制的角度精度是可以达到 **$180/1024$ 度**约**0.18度**了，从时间上看其实要求的脉宽控制精度为 **$(2.5-0.5)/1024\text{ms}$** 约**2us**。
- ★说明：如果舵机连控制精度为**1度**都达不到的话，而且还看到舵机在发抖。在这种情况下，只要舵机的电压没有抖动，那抖动的就是你的控制脉冲了。

实验室所用舵机——MG945



1.工作速度：
无负载速度**0.17秒/60度**
(4.8V) 0.13秒/60度(6.0V)

2.工作电压：**4.8V-7.2V**

3.死区设定：**4微秒**

4.使用温度：**-30~~+60摄氏度**

5.扭矩：**13KG**

6.重量：**62g**

7.尺寸：
40mmX20mmX36.5mm

实验室所用舵机——HS-7955



❖ 输出扭力:

- 18kg. cm (4.8V)

- 24kg. cm (6.0V)

❖ 动作速度:

- 0.19sec/60° (4.8V)

- 0.15sec/60° (6.0V)

❖ 额定电压:DC 4.8-6V

❖ 操作温度:

- -20° C至+60° C

❖ 尺寸:40 x 20 x 37mm

❖ 重量:62g

实验室所用舵机——Ild-403P



1.工作速度:

0.21秒/60度(6.0V)

0.19秒/60度(7.4V)

2.工作电压: 6V-7.4V

3.使用温度: -30~~+60摄氏度

4.扭矩: 12KG/cm-13.6KG/cm

5.重量: 57g

6.尺寸:

40.2mmX20.4mmX41.5mm

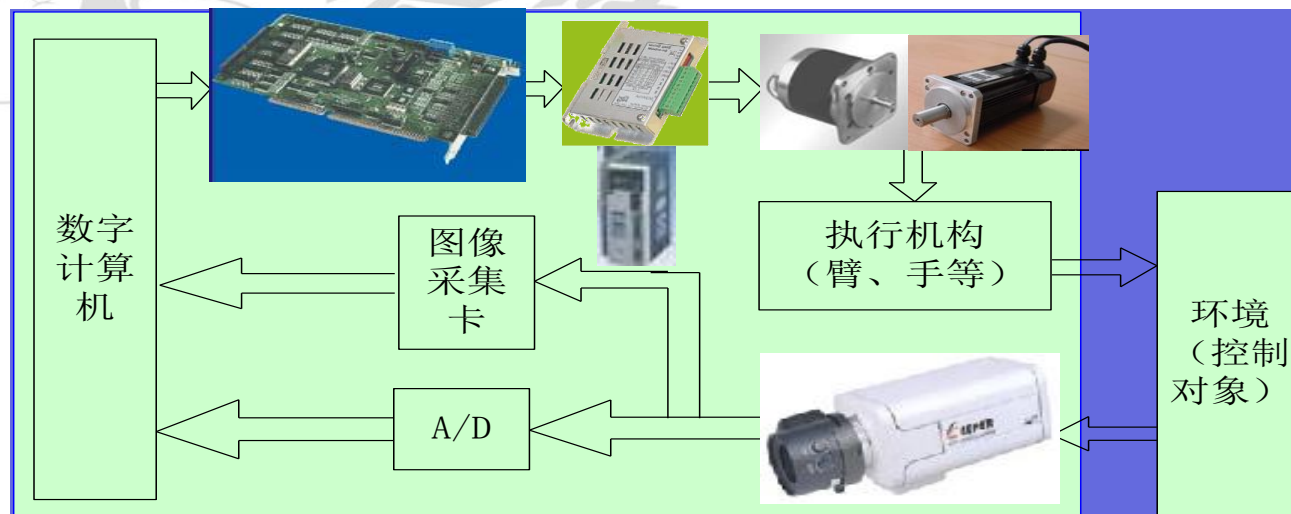
其他常用舵机:

Futaba S3001/S3003 	最常用的标准舵机, 日本Futaba生产, 标准尺寸。电压4.8~6V。单价约80元。 尺寸40.4*19.8*36mm 重量38.2g 最大转角185° 输出力矩3.2kg·cm(4.8V) 速度0.22sec/60° (4.8V)
Futaba S5801 	5圈转动舵机, 电压4.8~7.2V, 单价约1000元。 尺寸:40*25*44mm 重量:83g 最大转角1800° 速度:0.5sec/60° (7.2V) 输出力矩:9.8kg·cm(7.2V)
futaba S9252 	较大扭矩标准尺寸数字舵机。高速, 精确。电压4.8~6V, 单价约900元。 尺寸:40*20*36.6mm 重量:50g 速度:0.14sec/60° (4.8V) 输出力矩:6.6kg·cm(4.8V)
Hitec HS805BB/815BB	大型、大扭矩舵机。电压4.8~6V, 单价约400元。 尺寸:59*29*51mm 重量:130g 速度:0.29sec/60° (6.0V) 输出力矩:19.8kg·cm(6.0V)
博创CDS9301	双端输出, 大扭矩数字舵机, 适合制作机器人关节, 数据见上文。单价约190元。
Hitec HSR5995TG 	钛合金齿轮, 双端输出, 标准尺寸、高速超大扭矩数字舵机。电压4.8~7.2V, 单价约850元。应该是目前最高性能的机器人舵机。 尺寸:40*20*37mm 重量:62g 速度:0.15sec/60° (6V) 0.12sec/60° (7.2V) 输出力矩:24kg·cm(6V) 30kg·cm(7.2V)

新型执行装置：

压电执行装置：利用在压电陶瓷等材料上施加电压而产生变形的压电效应。

形状记忆合金执行装置：利用镍钛合金等材料具有的形状随温度变化，温度恢复时形状也恢复的形状记忆性质。

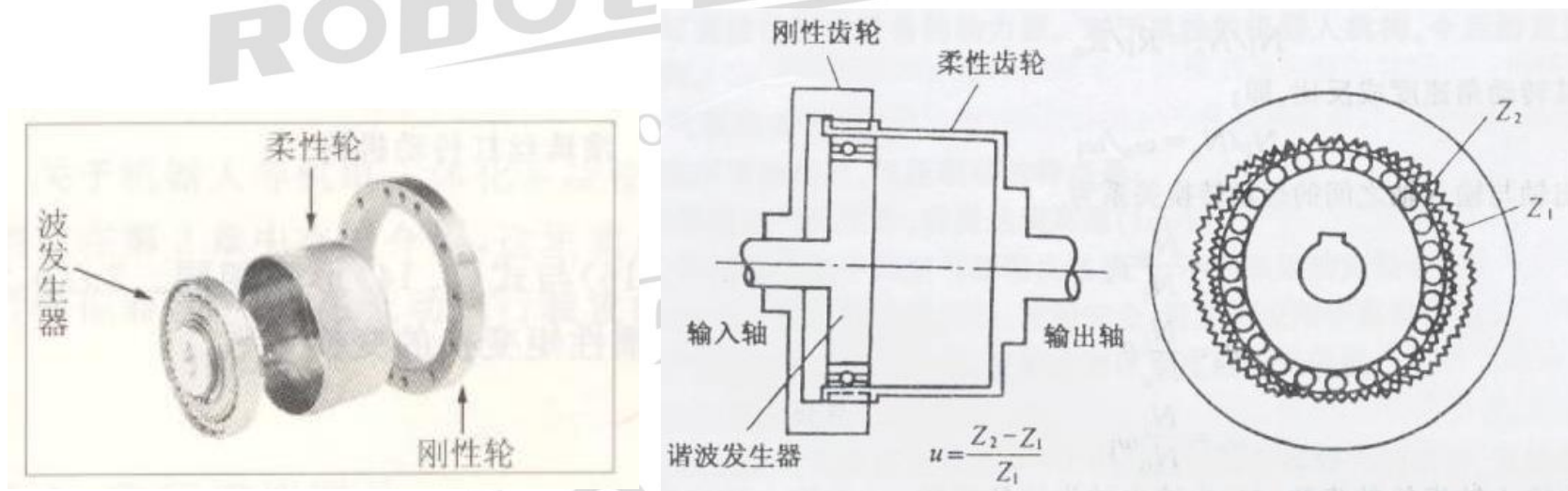


3.3 机械传动机构

- ❖ 传动机构有减速装置、力(力矩)和速度传递转换装置。常用的有螺旋传动、带传动、齿轮传动、链传动、杆机构、齿轮齿条机构和谐波传动等，此外还有一种新型的减速机构RV传动装置，以及作为传动的重要保障装置的导向部件。

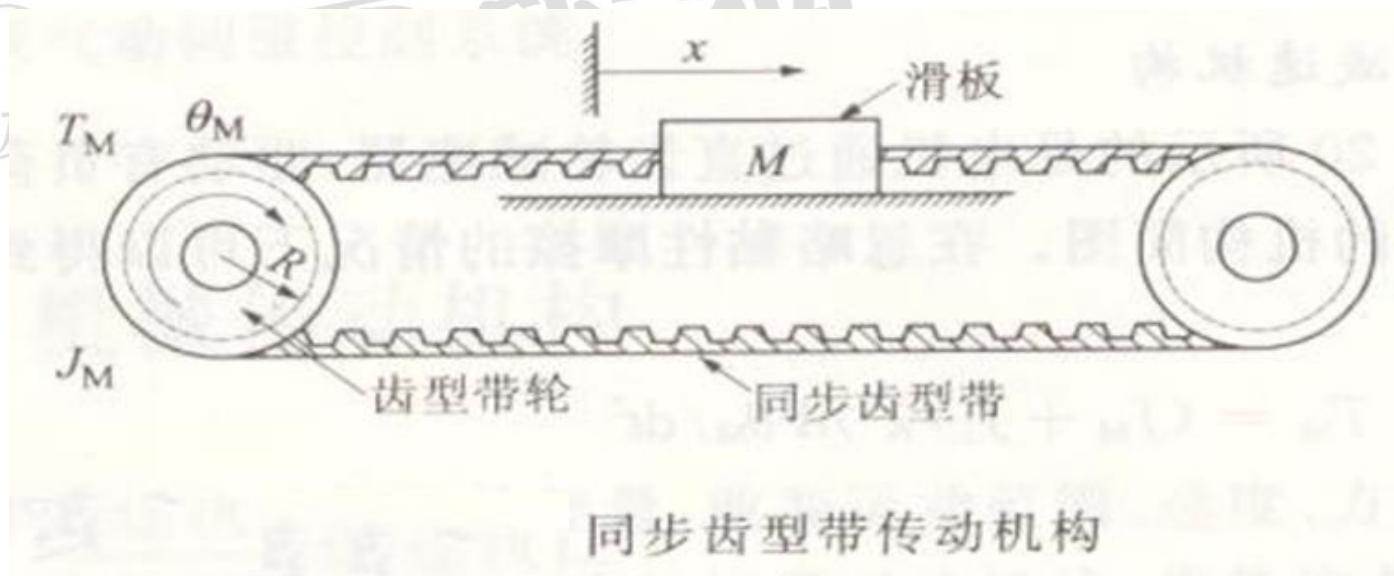
(1) 谐波齿轮减速器

目前，机器人的旋转关节有60%~70%都使用谐波齿轮。谐波齿轮由刚性齿轮、谐波发生器和柔性齿轮组成。



假设刚性齿轮由100个齿，柔性齿轮比它少2个齿，则当谐波发生器转50圈时，柔性齿轮转1圈，这样只占用了很小的空间就可得到1:50的减速比。

(2) 同步齿型带



同步齿型带（带齿的皮带）、V型带（三角皮带）、平型带、链、绳索（钢丝绳）、连杆等机构都是长距离传递运动的机构。四连杆机构刚度好、精度高，机械手等系统上经常使用。