

5.1 驱动器的发展

根据牛顿力学定律,力是物体运动发生改变的原因,即动力是运动改变的源泉。同时动力也是人类社会进步的关键,如何通过自动产生动力来代替人力一直以来都是运动控制的研究问题。动力系统的发展是伴随着三次工业革命进行的。

第一次工业革命以蒸汽机(steam engine)为代表。此次技术革命以蒸汽机作为动力机被广泛使用为标志。早期的蒸汽机组成如图 5.1 所示。

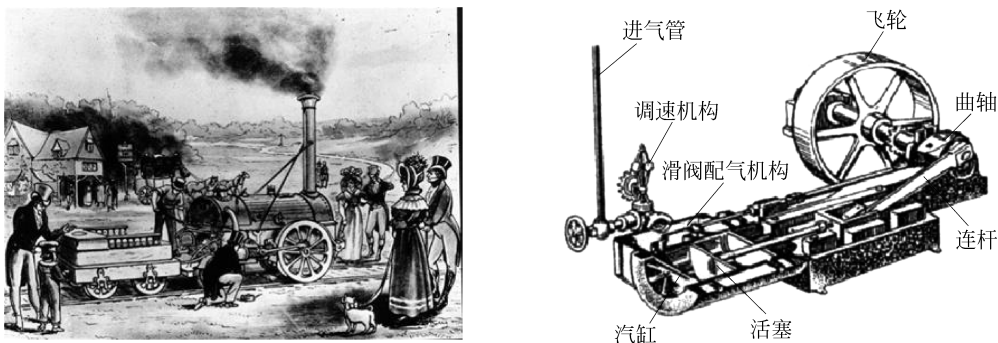


图 5.1 蒸汽机示例

第二次工业革命以内燃机(internal combustion engine)为代表。当时,科学技术的发展主要表现在三个方面,即电力的广泛应用、内燃机和新交通工具的创制、新通信手段的发明。其中内燃机是典型的动力机。二冲程汽油内燃机结构及工作过程如图 5.2 所示。

内燃机是将热能转化为机械能的一种热机。内燃机将液体或气体燃料与空气混合后,直接输入汽缸内部的高压燃烧室燃烧爆发产生动力。内燃机具有体积小、质量小、便于移动、热效率高、起动性能好的特点。相比蒸汽机,内燃机效率更高,机构更紧凑。

第三次工业革命是以电动机为代表,以原子能、电子计算机、空间技术和生物工程的发明和应用为主要标志,涉及信息技术、新能源技术、新材料技术、生物技术、空间技术和海洋技术等诸多领域的一场信息控制技术革命。

总体上讲,能够提供驱动力的装置称为驱动器。目前最为实用的驱动器主要是将电能或热能转变成可控制的运动的装置,其原理如图 5.3 所示。

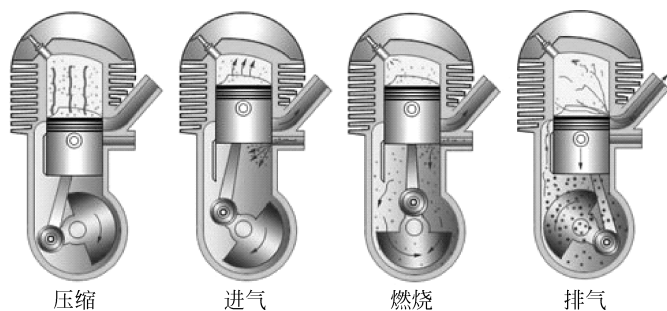


图 5.2 二冲程汽油内燃机

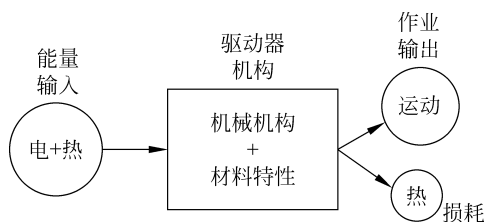


图 5.3 驱动器图示

从图 5.3 可见,驱动器在将输入能量转变成运动输出的同时,也会伴随着能量的损耗,例如发热、振动、噪声等。运动输出和能量损失之间的比值代表了驱动器的能效。

三次工业革命产生的驱动器多用于实现转动运动,只有少数驱动器可直接实现平动运动。为了将转动转变成平动需要采用运动转换机构。目前,直接可输出平动运动的驱动器研究越来越热,也产生了比较经济实用的直线驱动器,例如直线电动机、磁悬浮等技术。

伴随着信息技术和智能材料的发展,驱动器的发展向着更加节能、环保的方向发展,功率重量比更大。新型驱动器,例如形状记忆合金、人工肌肉、压电元件、挠性轴丝绳集束传动等获得研究重视,在实用方面已达到电动机水平。

5.2 致动方式

1. 静电

静电(electrostatic)是人类很早就发现的现象,可用于提供动力,如用来制作静电电动机。静电电动机是利用静电为能量源的一种能量转换装置,具有结构简单、空载转速高的优点,是微机电系统(micro electro mechanical system, MEMS)中的关键部件。但静电电动机有功率小、起动难等缺点。目前,在航天卫星和医疗器械领域中已经开始尝试用静电电动机来代替传统的电磁型电动机。

2. 电磁

电磁(electromagnetic)是物质所表现的电性和磁性的统称,例如电磁感应、电磁波等,由法拉第(Faraday)最早发现,是电动机工作的基本原理。电磁现象产生的原因在于电荷运动产生波动,形成磁场,因此所有的电磁现象都离不开磁场。电磁学是研究电磁间的相互作用现象,及其规律和应用的物理学分支学科。麦克斯韦(Maxwell)关于变化电场产生磁场



视频讲解

的假设,奠定了电磁学的整个理论体系,发展了对现代文明起重大影响的电工和电子技术。电磁基本原理如图 5.4 所示。

图 5.4 所示的是一种微小的硅电动机,转子的直径为 $130\mu\text{m}$,驱动电压为 $25\sim 36\text{V}$ 。

3. 相变

物质从一种相转变为另一种相的过程称为相变(phase change),不同相之间的物理、化学性质完全相同,但其他部分具有明显分界。与固、液、气三态对应,物质有固相、液相、气相。例如石蜡(paraffin wax)热膨胀驱动器,驱动过程中发生了固体—液体—气体的相变。石蜡热膨胀驱动器原理如图 5.5 所示。

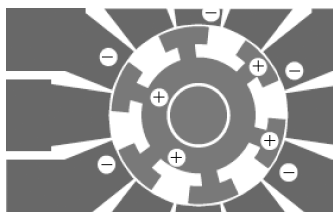


图 5.4 硅电动机电磁原理

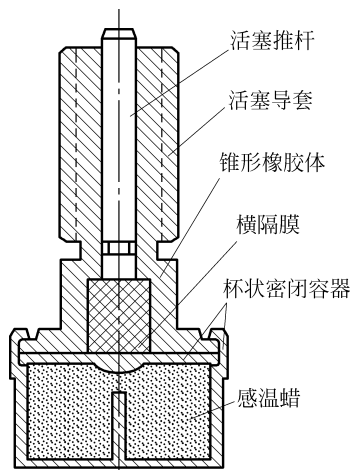


图 5.5 石蜡热膨胀驱动器原理图

在感温蜡的相变过程中,密闭容器内的压力会发生改变,从而推动活塞杆运动。此外,利用水低温相变为冰时的体积膨胀可提供超高压静压驱动力。

4. 热机

物质有热胀冷缩的现象。热机(thermomechanical)利用物体吸热后的变形来提供驱动力,如图 5.6 所示。

由于热变形一般比较小,往往用于驱动行程不大,但对空间尺寸或频率、安全性等有特殊要求的场合。图 5.6(a)所示为利用热机原理制作的微小硅悬臂梁,长度只有 $200\mu\text{m}$,动作幅度 $4\mu\text{m}$,但频率可达 1kHz 以上;图 5.6(b)所示为利用热机原理制作的复合金属温度调节装置,特点是将温度的感知和调节动作集成在一起实现。



加热元件

(a)



(b)

图 5.6 热机原理及示例

5. 压电

压电(piezoelectric)材料电介质在沿一定方向上受到外力的作用而变形时,其内部会产生极化现象,同时在两个相对表面上出现正负相反的电荷。当外力去掉后,又会恢复到不带电的状态,这种现象称为正压电效应。当作用力的方向改变时,电荷的极性也随之改变。相反,当在电介质的极化方向上施加电场,这些电介质也会发生变形,电场去掉后电介质的变形随之消失,这种现象称为逆压电效应,或称为电致伸缩现象。依据电介质压电效应研制的传感器称为压电传感器。压电效应的原理如图 5.7 所示。

压电效应往往出现在压电晶体和压电陶瓷材料中。基于压电原理制作的精确控制机构——压电驱动器,在精密仪器和机械的控制、微电子技术、生物工程等领域都有广泛应用。

6. 形状记忆效应

合金的形状被改变之后,一旦加热到一定的跃变温度时,又可以变回到原来的形状,具有这种特殊功能的合金称为形状记忆合金(shape memory alloy)。形状记忆效应(shape memory effect)的原理如图 5.8 所示。

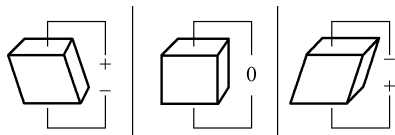


图 5.7 压电效应原理图

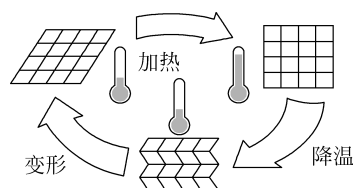


图 5.8 形状记忆效应

利用形状记忆效应制作的驱动器驱动的装置如图 5.9 所示。

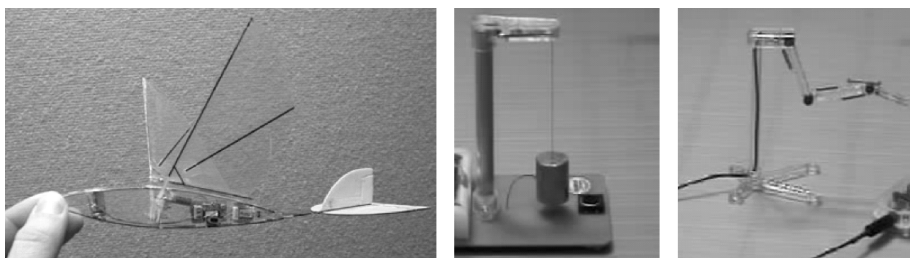


图 5.9 形状记忆合金丝驱动的装置示例

形状记忆合金丝具有很高的功率重量比,且无须减速等运动传动装置,能量转换效率较高。

7. 磁致伸缩

磁致伸缩(magnetostrictive)是铁磁物质(磁性材料)由于磁化状态的改变,其尺寸在各方向发生变化。除了加热外,磁场和电场也会导致物体尺寸的伸长或缩短。铁磁性物质在外磁场作用下,其尺寸伸长(或缩短),去掉外磁场后,其又恢复原来的长度,这种现象称为磁致伸缩现象(或效应)。磁致伸缩的基本原理如图 5.10 所示。

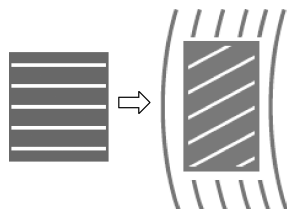


图 5.10 磁致伸缩的基本原理

8. 电致动聚合物

在外加电场的作用下,导致物体内部离子呈现有规律运动,从而使得聚合物发生变形。电致动聚合物(electroactive polymer)的基本原理及示例如图 5.11 所示。

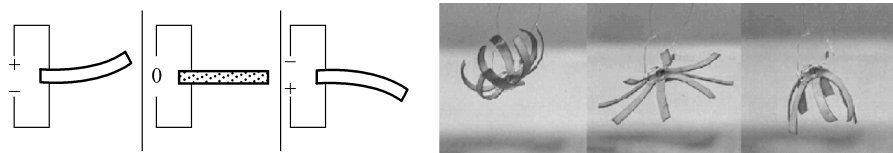


图 5.11 电致动聚合物的基本原理及示例

9. 磁流体力学

磁流体(magnet hydro dynamic, MHD)又称磁性液体、铁磁流体或磁液,是一种新型的功能材料,既具有液体的流动性又具有固体磁性材料的磁性。由直径为纳米量级(10nm 以下)的磁性固体颗粒、基载液(也叫媒体)以及界面活性剂三者混合而成的一种稳定的胶状液体。该流体在静态时无磁性吸引力,当外加磁场作用时,才表现出磁性,如图 5.12 所示。磁流体在实际中有着广泛的应用,在理论上具有很高的学术价值。用纳米金属及合金粉末生产的磁流体性能优异。

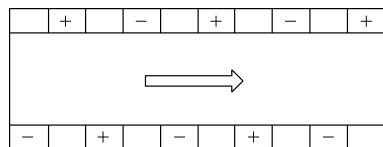


图 5.12 磁流体原理

10. 电流变和磁流变

悬浮液在没有加上电场时,可以像水或油一样自由流动。当加上电场时,几毫秒内就立即由自由流动的液体变成固体;而且随电场强度和电压的增加,固体的强度也增加。同时当撤销电场时,又能立即由固体变回到液体。因为这种悬浮液的状态可以用电场来控制,称为电流变体(electrorheological fluid),并把这种现象称为电流变现象。这种能用电场控制来改变物质状态的现象,可用来实现把高速计算机的电信号指令直接变成机械动作。电流变原理如图 5.13 所示。

磁流变液(magnetorheological fluid)属可控流体,是智能材料中研究较为活跃的一支。磁流变液是由高磁导率、低磁滞性的微小软磁性颗粒和非导磁性液体混合而成的悬浮体。这种悬浮体在零磁场条件下呈现出低黏度的牛顿流体特性;而在强磁场作用下,则呈现出高黏度、低流动性的 Bingham 体特性。由于磁流变液在磁场作用下的流变是瞬间的、可逆的,而且其流变后的剪切屈服强度与磁场强度具有稳定的对应关系,因此是一种用途广泛、性能优良的智能材料。磁流变原理如图 5.14 所示。

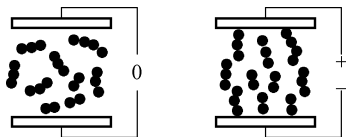


图 5.13 电流变原理

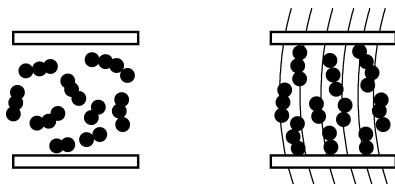


图 5.14 磁流变原理

11. 生物肌肉

生物肌肉(biomuscle)是生物学上可收缩的组织,具有信息传递、能量传递、废物排除、能量供给、传动以及自修复功能,一直以来就是研究者开发驱动器灵感的来源。人类肌肉是由许多束肌纤维(直径约为 $10 \sim 100 \mu\text{m}$)组成。而这些纤维是由直径更小的肌原纤维(myofibril)组成。在肌原纤维中,肌动蛋白丝和肌球蛋白丝平行排列,在横向保持一定距离并相互穿插,即组成所谓的横桥结构。当肌纤维受到外界刺激(例如神经脉冲)时,两种肌丝通过相互之间的滑行使重叠部分增加从而引起肌纤维的整体收缩。肌肉的特点是刺激频率越高,产生的收缩力越大。人体的肌肉驱动器如图 5.15 所示。

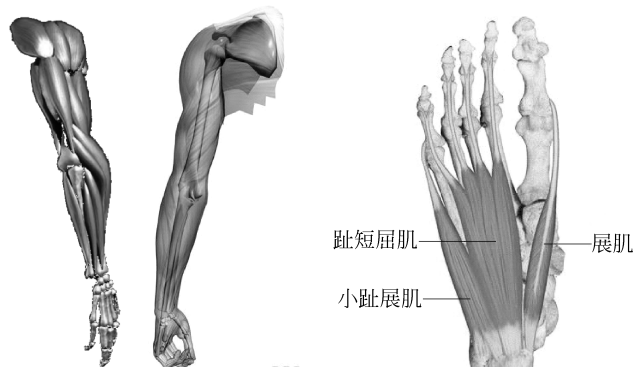


图 5.15 人体肌肉驱动方式

肌肉在接收神经刺激后,会产生收缩而引起骨骼的运动。由于肌肉只能“拉”而不能“推”,因此,需要一对肌肉一伸一缩来引起运动,肌肉对被互称为拮抗肌。

5.3 伺服电动机驱动器

伺服电动机又称为执行电动机,在自动控制系统中作为执行元件,可将输入的电压信号转换成转轴的角位移或角速度而输出。常见的伺服电动机的功率多为中容量(4000W 以下,三相供电电压)和小容量(750W 以下,单相供电电压)。伺服电动机按其使用的电源性质不同,可分为直流伺服电动机和交流伺服电动机两大类。

伺服电动机的种类多,用途也很广泛,运动控制系统对伺服电动机的基本要求如下。

(1) 宽广的调速范围。伺服电动机的转速随着控制电压的改变能在宽广的范围内连续调节。

(2) 机械特性和调节特性均为线性。伺服电动机的机械特性是指控制电压一定时,转速随转矩的变化关系;调节特性是指电动机转矩一定时,转速随控制电压的变化关系。线性的机械特性和调节特性有利于提高自动控制系统的动态精度。

(3) 无“自转”现象。伺服电动机在控制电压为零时能立刻自行停转。

(4) 快速响应。电动机的机电时间常数要小,相应的伺服电动机要有较大的堵转转矩(电动机在额定电压、额定频率和转子堵住时测得的最小转矩)和较小的转动惯量。

5.3.1 直流伺服电动机结构

直流电动机是指输入为直流电能的旋转电动机,能实现直流电能和机械能互相转换的电动机。直流电动机的结构应由定子和转子两部分组成。直流电动机运行时静止不动的部分称为定子,定子的主要作用是产生磁场,由机座、主磁极、换向极、端盖、轴承和电刷装置等组成。运行时转动的部分称为转子,其主要作用是产生电磁转矩和感应电动势,是直流电动机进行能量转换的枢纽,所以通常又称为电枢,由转轴、电枢铁芯、电枢绕组和换向器等组成。直流伺服电动机是指使用直流电源驱动的伺服电动机,其组成如图 5.16 和图 5.17 所示。

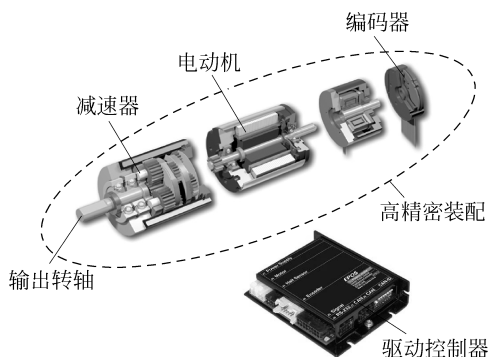


图 5.16 直流伺服电动机系统示例



图 5.17 典型的转子结构

根据有无换向电刷可分为直流有刷电动机和直流无刷电动机。

根据励磁方式可分为以下几种。

(1) 他励直流电动机励磁方式。励磁绕组与电枢绕组无连接关系,而由其他直流电源对励磁绕组供电的直流电动机称为他励直流电动机。永磁直流电动机也可看作他励直流电动机。

(2) 并励直流电动机励磁方式。并励直流电动机的励磁绕组与电枢绕组并联。作为并励发电机来说,是电动机本身发出来的端电压为励磁绕组供电。作为并励电动机来说,励磁绕组与电枢共用同一电源,从性能上讲与他励直流电动机相同。

(3) 串励直流电动机励磁方式。串励直流电动机的励磁绕组与电枢绕组串联后,再接于直流电源。这种直流电动机的励磁电流就是电枢电流。

(4) 复励直流电动机励磁方式。复励直流电动机有并励和串励两个励磁绕组。若串励绕组产生的磁通势与并励绕组产生的磁通势方向相同称为积复励,若两个磁通势方向相反,则称为差复励。

直流伺服电动机实际上就是一台他励式直流电动机。直流伺服电动机的结构可分为传统型和低惯量型两类。传统型直流伺服电动机由定子、转子两部分组成,其容量与体积较小。按照励磁方式的不同,又可以分为永磁式和电磁式两种。永磁式直流伺服电动机的定子磁极由永久磁钢构成。电磁式直流伺服电动机的定子磁极通常由硅钢片铁芯和励磁绕组构成,其结构如图 5.18 所示。这两种电动机的转子结构同普通直流电动机的结构相同,其铁芯均由硅钢片冲制叠压而成,在转子冲片的外圆周上开有均布的齿槽,在槽中放置电枢绕

组,并通过换向器和电刷与外部电路连接。

因系统对电动机快速响应的要求越来越高,因此各种低惯量的伺服电动机相继出现,例如盘形电枢直流电动机、空心杯电枢直流电动机和电枢绕组直接绕在铁芯上的无槽电枢直流电动机等。随着电子技术的发展,又出现了采用电子器件换向的新型直流伺服电动机,无传统直流电动机上的电刷和换向器,故称为无刷直流伺服电动机。此外,为了适应高精度低速伺服系统的需要,出现了直流力矩电动机,取消了减速机构而直接驱动负载。

与传统的直流伺服电动机相比,低惯量型直流伺服电动机具有时间常数小、响应速度快的特点。目前低惯量型直流伺服电动机的主要形式有杯形电枢直流伺服电动机、盘形电枢直流伺服电动机和无槽电枢直流伺服电动机。

1) 杯形电枢直流伺服电动机

图 5.19 为杯形电枢永磁式直流伺服电动机的结构简图,有一个外定子和一个内定子。

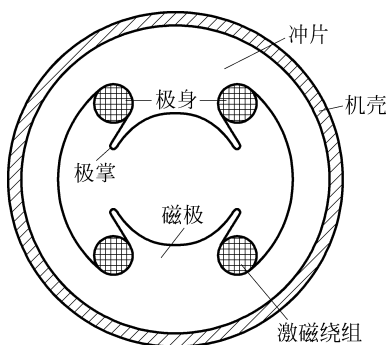


图 5.18 电磁式直流伺服电动机定子结构简图

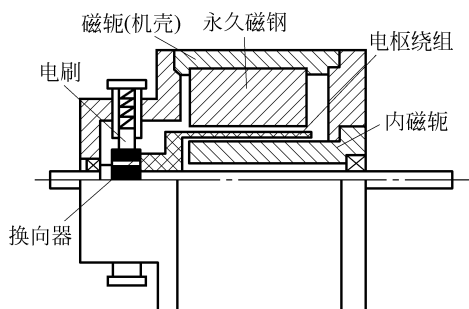


图 5.19 杯形电枢永磁式直流伺服电动机的结构简图

通常外定子是由两个半圆形的永久磁钢所组成,而内定子则为圆柱形的软磁材料做成,仅作为磁路的一部分,以减小磁路磁阻。但也有内定子由永久磁钢做成,外定子采用软磁材料的结构形式。杯形电枢直接装在电动机轴上,在内、外定子间的气隙中旋转。电枢绕组接到换向器上,由电刷引出。

杯形电枢直流伺服电动机的制造成本较高,大多用于高精度的自动控制系统及测量装置等设备中,如电视摄像机、录音机、X-Y 函数记录仪、机床控制系统等方面。

2) 盘形电枢直流伺服电动机

盘形直流伺服电动机以盘形永磁直流伺服电动机为主。电动机结构成扁平状,其定子是由永久磁钢和前后磁轭构成。电动机的气隙位于圆盘两边,永久磁铁为轴向磁化,在气隙中产生多极轴向磁场。圆盘上有电枢绕组。图 5.20 为印制绕组盘形电枢直流伺服电动机的结构简图。此种电动机常用电枢绕组有效部分的裸导体表面兼作换向器,但导体表面需另外镀一层耐磨材料,以延长使用寿命。图 5.21 为绕线式盘形电枢直流伺服电动机的结构简图。绕线式绕组则是先绕制成单个线圈,然后将绕好的全部线圈沿径向圆周排列起来,再用环氧树脂浇注成圆盘形。盘形电枢上电枢绕组中的电流是沿径向流过圆盘表面,并与轴向磁通相互作用而产生转矩。因此,绕组的径向段为有效部分,弯曲段为端接部分。

盘形电枢直流伺服电动机适用于低速相起动、反转频繁,要求薄形安装尺寸的系统中。目前它的输出功率一般在几瓦到几千瓦之间,其中功率较大的电动机主要用于数控机床、工

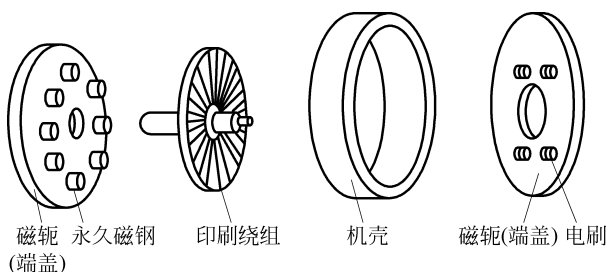


图 5.20 印制绕组盘形电枢直流伺服电动机的结构简图

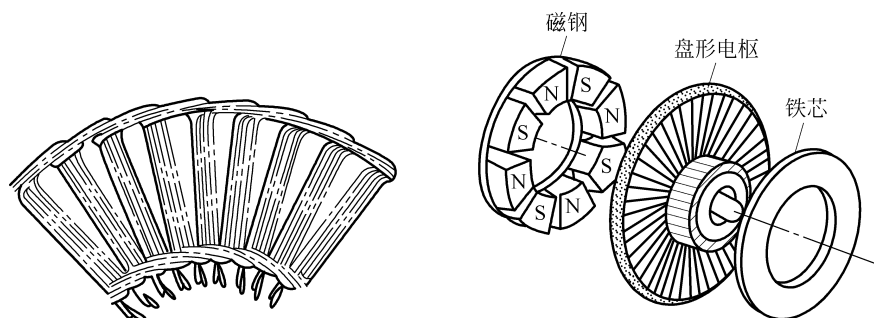


图 5.21 绕线式盘形电枢直流伺服电动机的结构示意图

业机器人、雷达天线驱动和其他伺服系统。

3) 无槽电枢直流伺服电动机

无槽电枢直流伺服电动机的结构同普通直流电动机的差别仅在于其电枢铁芯是光滑、无槽的圆柱体,电枢绕组直接排列在铁芯表面,再用环氧树脂把它与电枢铁芯固化成一个整体,如图 5.22 所示。定子磁极可以用永久磁钢做成,也可以采用电磁式结构。这种电动机的转动惯量和电枢绕组的电感比前面介绍的两种无铁芯转子的电动机要大些,因而其动态性能较差。

直流伺服电动机用在功率稍大的系统中。其输出功率为 $1 \sim 600\text{W}$,最高可达数千瓦。常用的直流伺服电动机输出功率为 $0.1 \sim 100\text{W}$,其中最常用的在 30W 以下。

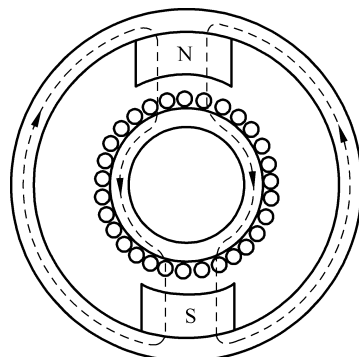


图 5.22 无槽电枢直流伺服电动机的结构简图

5.3.2 交流伺服电动机结构

交流电动机是用于实现机械能和交流电能相互转换的机械。交流伺服电动机通常采用笼形转子两相伺服电动机和空心杯转子两相伺服电动机,所以常把交流伺服电动机称为两相伺服电动机。由于交流电力系统的巨大发展,交流电动机已成为最常用的电动机。交流电动机与直流电动机相比,由于没有换向器和整流器,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、大容量的电动机。交流电动机功率的覆盖范围很大,从几瓦到几十万千瓦,甚至上百万千瓦。

1. 同步电动机结构

同步电动机结构与感应电动机一样,是一种常用的交流电动机,如图 5.23 所示。其特点是稳态运行时,转子的转速 n 和电网频率之间有不不变的关系:

$$n = n_s = \frac{60f}{p} \quad (5.1)$$

式中, f 为定子电流频率(Hz); p 为电动机的极对数; n_s 为同步转速(r/min)。

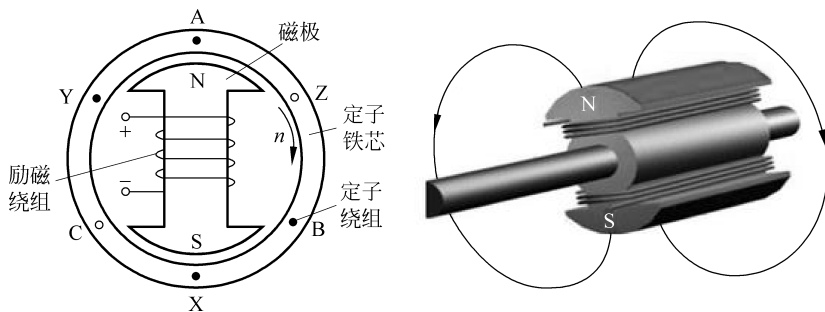


图 5.23 同步电动机结构模型

若电网的频率不变,则稳态时同步电动机的转速恒为常数而与负载的大小无关。同步电动机分为同步发电机和同步电动机。

现代发电厂中的交流机以同步电动机为主。励磁绕组通以直流励磁电流,建立极性相间的励磁磁场,即建立起主磁场。三相对称的电枢绕组充当功率绕组,成为感应电势或者感应电流的载体。原动机拖动转子旋转(给电动机输入机械能),极性相间的励磁磁场随轴一起旋转并顺次切割定子各相绕组(相当于绕组的导体反向切割励磁磁场)。由于电枢绕组与主磁场之间的相对切割运动,电枢绕组中将会感应出大小和方向按周期变化的三相对称交变电势。通过引出线,即可提供交流电源。

永磁同步电动机分类方法比较多。按工作主磁场方向不同,可分为径向磁场式和轴向磁场式;按电枢绕组位置不同,可分为内转子式(常规式)和外转子式;按转子上有无起动绕组,可分为无起动绕组的电动机(常称为调速永磁同步电动机)和有起动绕组的电动机(常称为异步起动永磁同步电动机);按供电电流波形不同,可分为矩形波永磁同步电动机和正弦波永磁同步电动机(简称为永磁同步电动机)。异步起动永磁同步电动机用于频率可调的传动系统时,称为具有阻尼(起动)绕组的调速永磁同步电动机。

永磁同步伺服电动机由定子、转子和端盖等部件组成。永磁同步伺服电动机的定子与异步伺服电动机定子结构相似,主要是由硅钢片、三相对称绕组、固定铁芯的机壳及端盖部分组成。对其三相对称绕组输入三相对称的空间电流可以得到一个圆形旋转磁场,旋转磁场的转速被为同步转速。

永磁同步伺服电动机的转子采用磁性材料组成,例如钕铁硼等永磁稀土材料,不再需要额外的直流励磁电路。永磁稀土材料具有很高的剩余磁通密度和很大的矫顽力,加上它的磁导率与空气磁导率相仿,对于径向结构的电动机交轴和直轴磁路磁阻都很大,可以在很大程度上减少电枢反应。永磁同步电动机转子按其形状可分为两类:凸极式永磁同步电动机和隐极式永磁同步电动机。凸极式是将永久磁铁安装在转子轴的表面,因为永磁材料的磁导率很接近空气磁导率,所以在交轴和直轴上的电感基本相同。隐极式转子则是将永久磁

铁嵌入到转子轴的內部,因此交轴电感大于直轴电感,且除了电磁转矩外,还存在磁阻转矩。

为了使得永磁同步伺服电动机具有正弦波感应电动势波形,其转子磁钢形状呈抛物线状,使其气隙中产生的磁通密度尽量呈正弦分布。定子电枢采用短距分布式绕组,能最大限度地消除谐波磁动势。

转子磁路结构是永磁同步伺服电动机与其他电动机最主要的区别。转子磁路结构不同,电动机的运行性能、控制系统、制造工艺和适用场合也不同。按照永磁体在转子上位置的不同,永磁同步伺服电动机的转子磁路结构一般可分为表面式、内置式和爪极式。永磁体通常呈瓦片形,并位于转子铁芯的外表面上,永磁体提供磁通的方向为径向,且永磁体外表面与定子铁芯内圆之间一般仅套上一个起保护作用的非磁性圆筒,或在永磁磁极表面包以无纬玻璃丝带作保护层。有的调速永磁同步电动机的永磁磁极用许多矩形小条拼装成瓦片形,能降低电动机的制造成本。

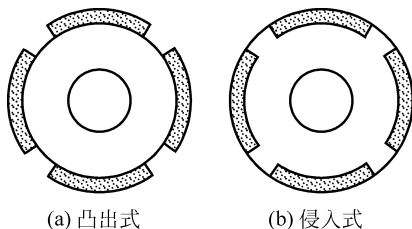


图 5.24 表面式转子磁路结构

表面式转子磁路结构又分为凸出式和侵入式两种,如图 5.24 所示。对采用稀土永磁的电动机来说,永磁材料的相对回复磁导率接近 1,所以表面凸出式转子在电磁性能上属于隐极转子结构;而在表面侵入式转子的相邻两永磁磁极间有着磁导率很大的铁磁材料,故在电磁性能上属于凸极转子结构。

表面式转子磁路结构的制造工艺简单,成本低,应用较为广泛,尤其适于矩形波永磁同步电动机。

但因转子表面无法安放起动绕组,无异步起动能力,故不能用于异步起动永磁同步电动机。永磁体位于转子内部,永磁体外表面与定子铁芯内圆之间有铁磁物质制成的极靴,极靴中可以放置铸铝笼或铜条笼,起阻尼或(和)起动作用,动、稳态性能好,广泛用于要求有异步起动能力或动态性能高的永磁同步电动机。内置式转子内的永磁体受到极靴的保护,其转子磁路结构的不对称性所产生的磁阻转矩,有助于提高电动机的过载能力和功率密度,而且易于“弱磁”扩速,按永磁体磁化方向与转子旋转方向的相互关系,内置式转子磁路结构又可分为径向式、切向式和混合式 3 种。

1) 径向式结构

如图 5.25 所示,径向式结构的优点是漏磁系数小,轴上不需采取隔磁措施,极弧系数易于控制,转子冲片机械强度高,安装永磁体后转子不易变形。图 5.25(a)是早期采用转子磁路结构,现已较少采用。图 5.25(b)和图 5.25(c)中,永磁体轴向插入永磁体槽并通过隔磁桥限制漏磁通,结构简单可靠,转子机械强度高,因而近年来应用较为广泛。图 5.25(c)比图 5.25(b)提供更大的永磁空间。

2) 切向式结构

如图 5.26 所示,切向式结构漏磁系数较大,并且需采用相应的隔磁措施,电动机的制造工艺和制造成本较径向式结构有所增加。其优点在于一个极距下的磁通由相邻两个磁极并联提供,每极可得到更大的磁通,尤其当电动机极数较多、径向式结构不能提供足够的每极磁通时,这种结构的优势更为突出。此外,采用切向式转子结构的永磁同步电动机磁阻转矩在电动机总电磁转矩中的比例可达 40%,这对充分利用磁阻转矩,提高电动机功率密度和扩展电动机的恒功率运行范围很有利。

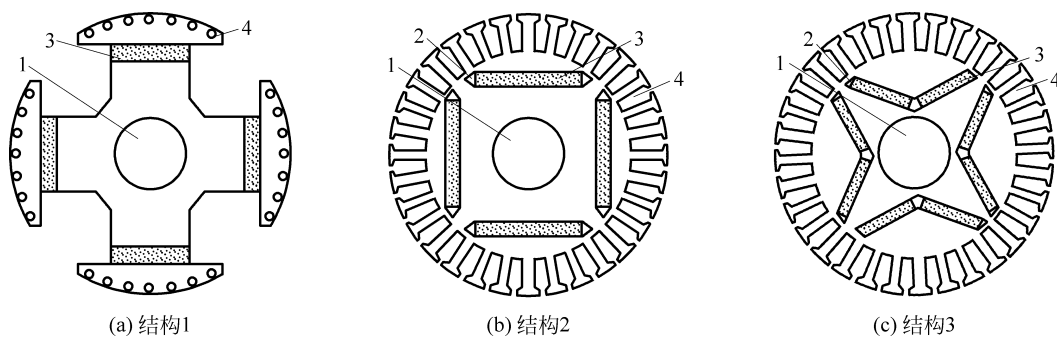


图 5.25 内置径向式转子磁路结构
1—转轴；2—永磁体槽；3—永磁体；4—起动笼

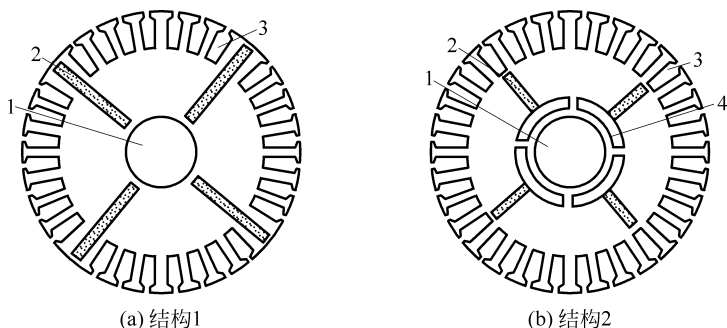


图 5.26 内置切向转子磁路结构
1—转轴；2—永磁体；3—起动笼；4—空气隔磁槽

3) 混合式结构

如图 5.27 所示,混合式结构集中了径向式和切向式转子结构的优点,但其结构和制造工艺较复杂,制造成本也比较高。图 5.27(a)需采用非磁性轴或采用隔磁铜套,主要应用于采用剩磁密度较低的铁氧体等永磁材料的永磁同步电动机。图 5.27(b)所示的结构采用隔磁磁桥隔磁,径向部分永磁体磁化方向长度约是切向部分永磁体磁化方向长度的一半。图 5.27(c)是由图 5.25(b)和图 5.25(c)的径向式结构衍生来的一种混合式转子磁路结构,其中,永磁体的径向部分与切向部分的磁化方向长度相等,也采取隔磁磁桥隔磁。

在选择转子磁路结构时还应考虑到不同转子磁路结构电动机的直、交轴同步电抗 X_d 、 X_q 及其比例关系 X_q/X_d (称为凸极率)也不同。在相同条件下,上述 3 类转子磁路结构电动机的直轴同步电抗 X_d 相差不大,但交轴同步电抗 X_q 却相差较大。切向式转子结构电动机的 X_q 最大,径向式转子结构电动机的 X_q 次之。

爪极式永磁转子结构通常由两个带爪的法兰盘和一个圆环形的永磁体构成,图 5.28 为其结构示意图。左右法兰盘的爪数相同,且两者的爪极互相错开,沿圆周均匀分布,永磁体轴向充磁,因而左右法兰盘的爪极形成极性相异、相互错开的永磁同步电动机的磁极。爪极式转子结构永磁同步电动机的性能较低,又不具备异步起动能力,但结构和工艺较为简单。

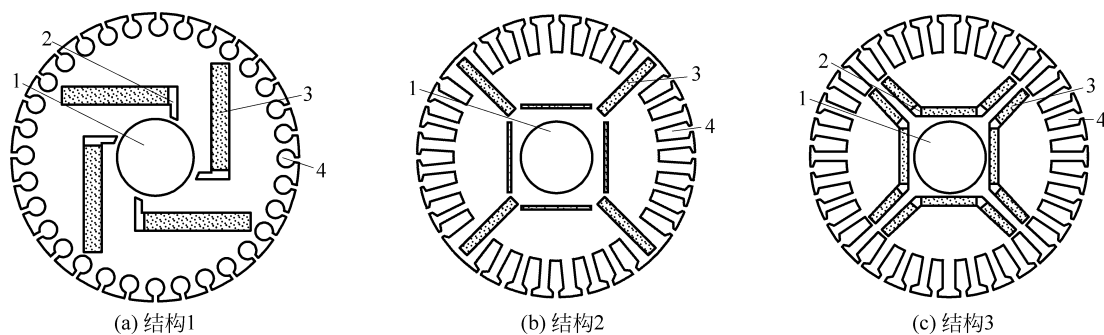


图 5.27 内置混合式转子磁路结构
1—转轴；2—永磁体槽；3—永磁体；4—起动笼

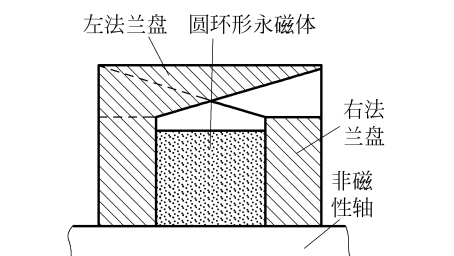


图 5.28 爪极式永磁转子结构

如前所述,为不使电动机中永磁体的漏磁系数过大而导致永磁材料利用率偏低,应注意各种转子结构的隔磁措施。如图 5.29 所示为 3 种典型的隔磁措施。图中标注尺寸 b 的冲片部位称为隔磁磁桥,通过磁桥部位磁通达到饱和来起限制漏磁的作用。

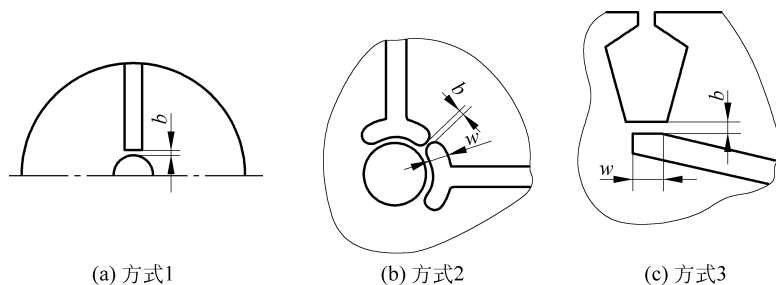


图 5.29 典型隔磁措施

切向式转子结构的隔磁措施一般采用非磁性铂或在轴上加隔磁铜套,这使得电动机的制造成本增加,制造工艺变得复杂。图 5.29(b)所示为采用空气隔磁加隔磁磁桥的新技术,但当电动机容量较大时,这种结构使得转子的机械强度显得不足,电动机可靠性下降。

三相永磁同步电动机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)是目前比较常用的交流同步电动机。PMSM 位置伺服系统具有位置环、速度环和电流环三闭环结构,电流环和速度环作为系统的内环,位置环为系统外环。PMSM 的结构如图 5.30 所示。

通常采用三相 Y 接 PMSM。PMSM 转子可以分为凸装式、嵌入式和内埋式 3 种,其结构如图 5.31 所示。

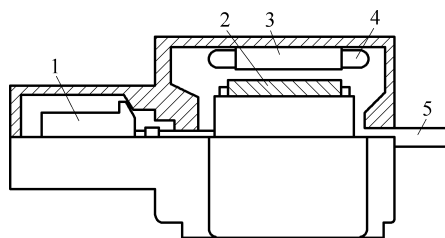


图 5.30 PMSM 的结构图

1—检测器；2—永磁体；3—电枢铁芯；4—三相电枢绕组；5—输出轴

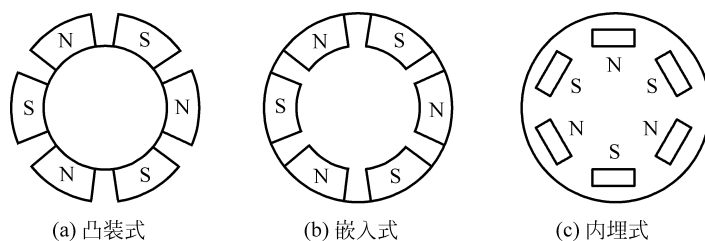


图 5.31 PMSM 转子的 3 种结构

2. 异步电动机结构

若电动机的转速(转子转速)小于旋转磁场的转速,则称为异步电动机。异步电动机和感应电动机基本上是相同的。异步电动机的发展迅速,最早的笼形异步电动机出现于 1889 年。异步电动机的优点是结构简单,制造方便,价格便宜,运行方便;缺点是功率因数滞后,轻载功率因数低,调速性能稍差。

当三相异步电动机接入三相交流电源时,三相定子绕组流过三相对称电流,产生三相磁动势(定子旋转磁动势)并产生旋转磁场。该旋转磁场与转子导体有相对切割运动,根据电磁感应原理,转子导体产生感应电动势并产生感应电流。根据电磁力定律,载流的转子导体在磁场中受到电磁力作用,形成电磁转矩,驱动转子旋转,当电动机轴上带机械负载时,便向外输出机械能。

传统交流伺服电动机的结构通常是采用鼠笼转子两相伺服电动机及空心杯转子两相伺服电动机,所以常把交流伺服电动机称为两相异步伺服电动机。

异步伺服电动机结构分为定子和转子两部分。定子铁芯中安放空间互成 90° 电角度的两相绕组,其中一相作为励磁绕组,运行时接至交流电源上;另一相作为控制绕组,输入控制电压;励磁电压与控制电压的频率相同。异步伺服电动机的转子通常有 3 种结构形式:高电阻率导条的笼形转子、非磁性空心杯转子和铁磁性空心转子。应用较多的是前两种结构。

1) 高电阻率导条的笼形转子结构

与普通鼠笼式异步电动机类似,但是为了减小转子的转动惯量,将转子做得细而长。转子笼条和端环既可采用高电阻率的导电材料制造,也可采用铸铝转子,其结构示意图如图 5.32 所示。

2) 非磁性空心杯形转子结构

如图 5.33 所示,定子分外定子铁芯和内定子铁芯两部分,由硅钢片冲制后叠压而成。外定子铁芯槽中放置空间相距 90° 电角度的两相分布绕组。内定子铁芯中不放绕组,仅作

为磁路的一部分,以减小主磁通磁路的磁阻。空心杯形转子用非磁性铝或铝合金制成,放在内、外定子铁芯之间,并固定在转轴上。

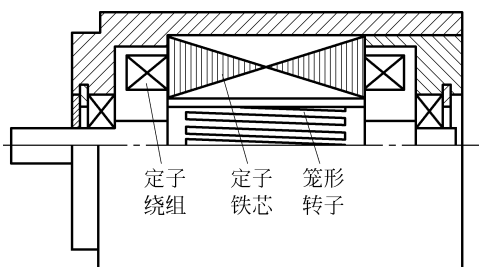


图 5.32 笼形转子异步伺服电动机

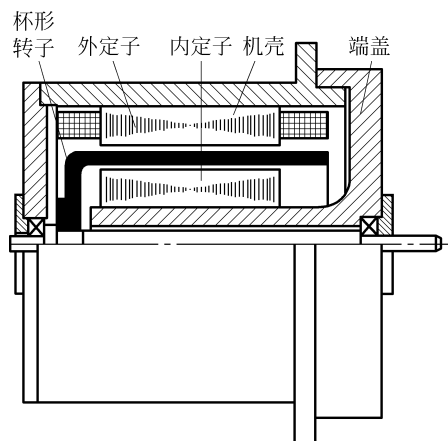


图 5.33 非磁性杯形转子异步伺服电动机

非磁性杯形转子的壁很薄,一般在 0.3mm 左右,因而具有较大的转子电阻和很小的转动惯量。其转子上无齿槽,故运行平稳,噪声小。这种结构的电动机空气隙较大,内外定子铁芯之间的气隙可达 $0.5\sim 1.5\text{mm}$ 。因此,电动机的励磁电流较大,为额定电流的 $80\%\sim 90\%$,致使电动机的功率因数较低,效率也较低,体积和质量都要比同容量的笼形伺服电动机大得多。同样体积下,杯形转子伺服电动机的堵转转矩要比笼形的小得多,因此采用杯形转子大大减小了转动惯量,但快速响应性能并不一定优于笼形结构。因笼形伺服电动机在低速运行时会有抖动现象,而非磁性杯形转子异步伺服电动机可克服这一缺点,常被用于要求低速平滑运行的系统中。

3) 铁磁性空心转子结构

电动机结构比较简单,转子采用铁磁材料制成,转子本身既是主磁通的磁路,又作为转子绕组,因此不需要内定子铁芯。其转子结构有两种形式,如图 5.34 所示。为了使转子中的磁通密度不至于过高,铁磁性空心转子的壁厚也相应增加,为 $0.5\sim 3\text{mm}$,因而其转动惯量较非磁性空心杯转子要大得多,快速响应性能也较差。当定、转子气隙稍有不均匀时,转子就容易因单边磁拉力而被“吸住”,所以目前应用得较少。

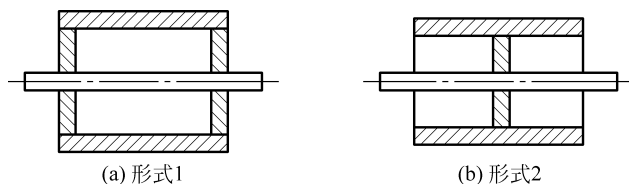


图 5.34 铁磁性空心转子

交流伺服电动机按相数可分为单相、两相、三相和多相。

5.3.3 直线电动机结构

直线电动机也称为线性电动机或推杆电动机等。最常用的直线电动机类型是平板式、

U形槽式和管式。线圈的典型组成是三相,用霍尔元件实现无刷换相。

直线电动机与旋转电动机工作原理相同,对比如图 5.35 所示。动子(rotor)常由环氧材料把线圈压缩在一起制成。磁轨通常是高能量的稀土磁铁固定在钢轨上。电动机的动子包括线圈绕组、霍尔元件电路板、电热调节器(温度传感器监控温度)和电子接口。在旋转电动机中,动子和定子需要旋转轴承支撑动子以保证相对运动部分的气隙(air gap)。同样,直线电动机需要直线导轨来保持动子在磁轨产生的磁场中的位置。和旋转伺服电动机的编码器安装在轴上反馈位置类似,直线电动机需要反馈直线位置的反馈装置,例如直线编码器,可以直接测量负载的位置从而提高负载的位置精度。

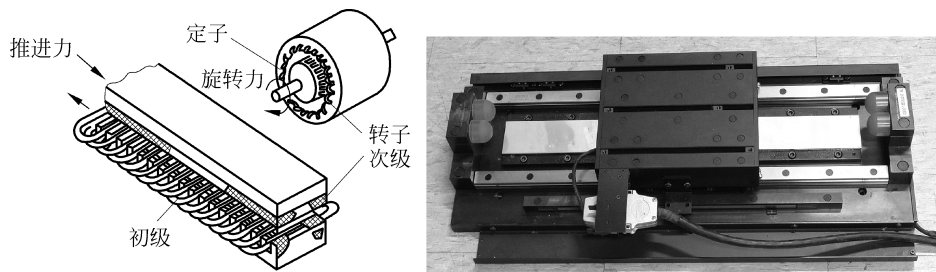


图 5.35 直线电动机与旋转电动机的对比及直线电动机示例

直线电动机的控制和旋转电动机一样,像无刷旋转电动机,动子和定子无机械连接(无刷)。但与旋转电动机不同的方面是动子旋转和定子位置保持固定。直线电动机系统可以是磁轨动或推力线圈动(大部分定位系统应用是磁轨固定,推力线圈动)。用推力线圈运动的电动机,推力线圈的重量和负载比很小,还需要高柔性线缆及其管理系统。用磁轨运动的电动机,不仅要承受负载,还要承受磁轨质量,但无须线缆管理系统。

相同的电磁力在旋转电动机上产生力矩,在直线电动机产生直线推力作用。因此,直线电动机使用和旋转电动机相同的控制和编程装置。

5.3.4 电动机的驱动放大器

由于控制器输出的控制信号是弱电信号,需转换成可以驱动电动机带动负载运动的强电,因此,控制电动机转动的控制器与电动机之间需通过驱动放大器连接。驱动器的功能就是根据电动机的控制方式,将控制信号转变成可控制电动机位置、转速和力矩的驱动信号,例如电流变化、电压变化、频率变化、相位变化等。此部分涉及电力电子和电路方面的知识。

伺服放大器也叫伺服驱动器,是用来控制伺服电动机的一种控制器。目前主流的伺服放大器均采用数字信号处理器(digital signal processors, DSP)作为控制核心,可以实现比较复杂的控制算法,实现数字化、网络化和智能化。伺服驱动器主要包括功率驱动单元和伺服控制单元,伺服控制单元是整个伺服系统的核心,实现系统位置控制、速度控制、转矩和电流控制器。功率器件普遍采用以智能功率模块(intelligent power module, IPM)为核心设计的驱动电路,IPM 内部集成了驱动电路,同时具有过电压、过电流、过热、欠压等故障检测保护电路,在主回路中还加入软起动电路,以减小起动过程对驱动器的冲击。以三相永磁式同步交流伺服电动机驱动器为例,功率驱动单元首先通过三相全桥整流电路对输入的三相电或者市电进行整流,得到相应的直流电。经过整流好的三相电或市电,再通过三相正弦

PWM 电压型逆变器变频来驱动三相永磁式同步交流伺服电动机。功率驱动单元的整个工作过程可以归纳为 $AC \rightarrow DC \rightarrow AC$ 的过程。

5.4 液压驱动器

液压传动是以油液作为工作介质,依靠密封容积的变化来传递运动,依靠油液内部的压力来传递动力。传统的液压系统的组成如下。

- (1) 动力部分——液压泵(将机械能转化成压力能)。
- (2) 执行部分——液压缸(将压力能转化成机械能)。
- (3) 控制部分——控制阀(控制方向、压力及流量)。
- (4) 辅助部分——油箱、油管、滤油器。
- (5) 工作介质——液压油。液压系统的工作原理和常见的液压元器件如图 5.36 所示。

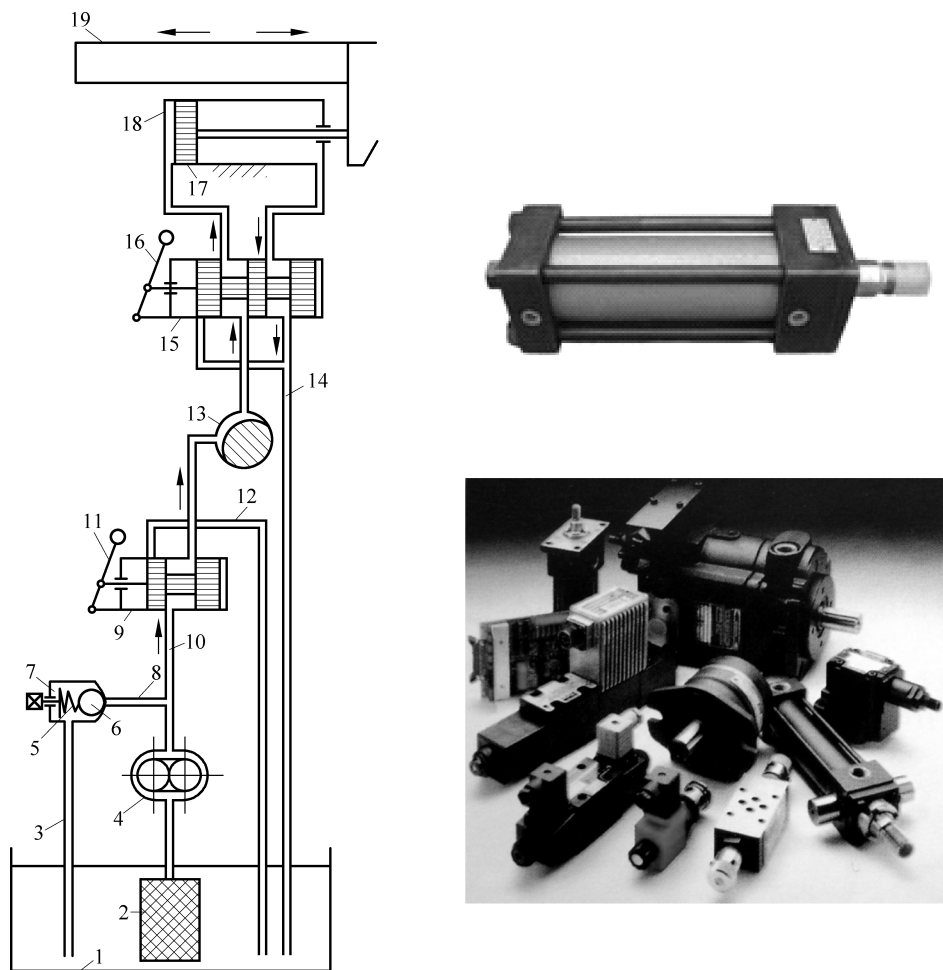


图 5.36 液压系统工作原理及常见的液压元器件示例

1—油箱；2—滤油箱；3、8、10、12、14—油管；4—液压泵；5、6、7—溢流阀；
9、11—开停阀；13—节流阀；15、16—换向阀；17、18—液压缸

5.5 气压驱动器

气压传动以压缩空气为工作介质来进行能量和信号的传递,以实现生产自动化。气压传动系统包含:气源装置——获得压缩空气的设备、空气净化设备,例如空压机、空气干燥机等;执行元件——将气体的压力能转换成机械能的装置,也是系统能量输出的装置,例如汽缸、气电动机等;控制元件——用于控制压缩空气的压力、流量、流动方向以及系统执行元件工作程序的元件,例如压力阀、流量阀、方向阀和逻辑元件等;辅助元件——起辅助作用,例如过滤器、油雾器、消声器、散热器、冷却器、放大器及管件等。典型的气压伺服控制系统原理如图 5.37 所示。

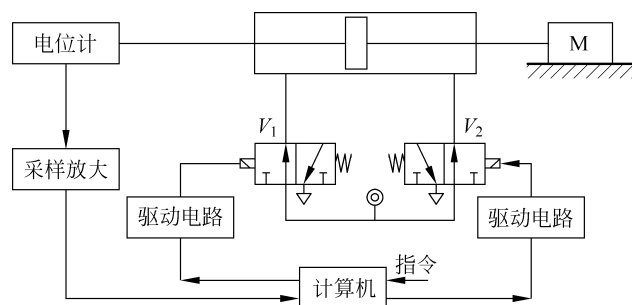


图 5.37 典型的气压伺服控制系统原理图

由于气压技术的快速性和清洁性,气压驱动得到了广泛应用,如图 5.38 和图 5.39 所示。

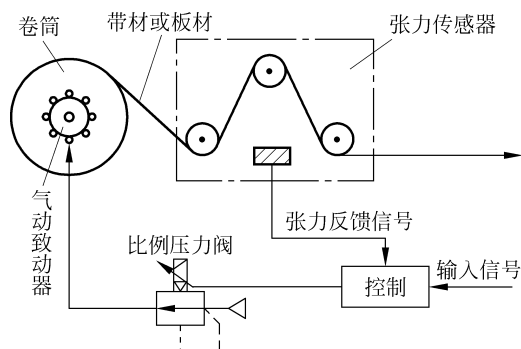


图 5.38 气压张力控制系统

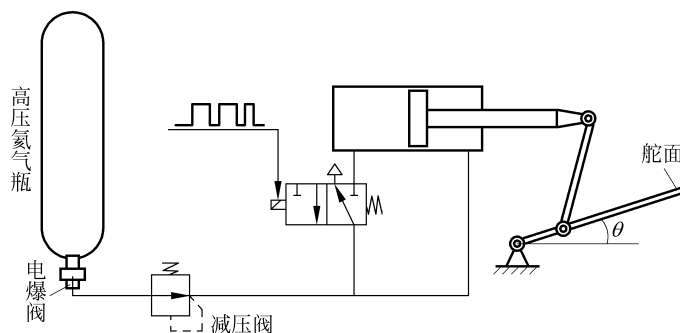


图 5.39 导弹舵机系统原理图

5.6 压电陶瓷驱动器

压电效应及其驱动器如图 5.40 所示。压电效应已经被科学家应用在与人们生活密切相关的许多领域,以实现能量转换、传感、驱动、频率控制等功能。在能量转换方面,利用压电陶瓷将机械能转换成电能的特性,可以制造出压电点火器、移动 X 光电源、炮弹引爆装置。电子打火机中就有压电陶瓷制作的火石,打火次数可在 100 万次以上。用压电陶瓷把电能转换成超声振动,可以用来探寻水下鱼群的位置和形状,对金属进行无损探伤,以及超声清洗、超声医疗,还可以做成各种超声切割器、焊接装置及烙铁,对塑料甚至金属进行加工。

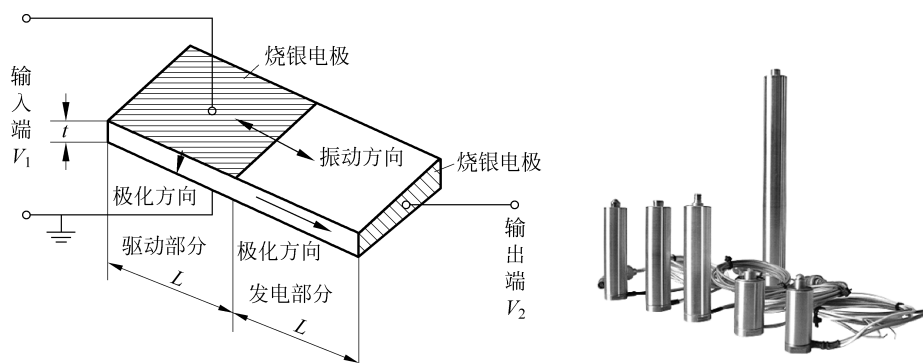


图 5.40 压电效应及其驱动器示例

5.7 形状记忆合金驱动器

5.7.1 形状记忆合金驱动器模型

由于形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)在各领域的特效应用,被誉为“神奇的功能材料”。各种驱动器负重能力对比如图 5.41 所示。

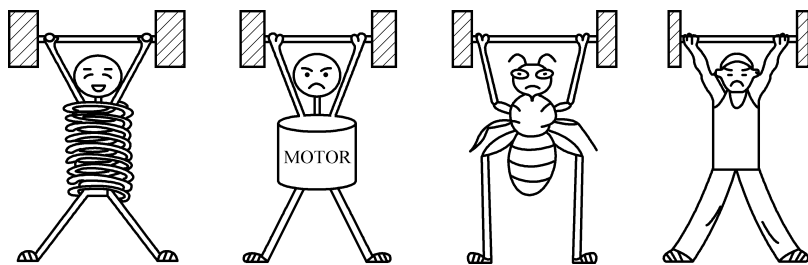


图 5.41 功率重量比较

SMA 是一种热敏性功能材料。在发生塑性变形后, SMA 丝加热到某一温度时,能够恢复到记忆中变形前的状态。形状记忆效应的本质是合金材料的晶体结构在马氏体和奥氏体之间的循环相变。SMA 一维本构方程的增量表达式为

$$d\sigma = -D_s d\epsilon_{SMA} + \Omega d\xi + \Theta dT \quad (5.2)$$

式中, σ 为 SMA 丝所受到的外拉力(N); D_s 为材料的拉伸弹性模量系数; Ω 为材料的相变

模量系数; Θ 为材料的热弹性模量系数; ξ 为马氏体体积百分数; T 为 SMA 丝温度($^{\circ}\text{C}$); ϵ_{SMA} 为 SMA 丝加热后的收缩率。

$\epsilon_{\text{SMA}} \geq 0$, 定义为

$$\epsilon_{\text{SMA}} = \frac{l_0 - l}{l_0} \quad (5.3)$$

式中, l_0 为 SMA 丝在外拉力 σ 作用下伸长后的长度(m); l 是单根 SMA 丝的初始长度(m)。

采用余弦型马氏体相变动力学模型, 降温过程中, 即奥氏体向马氏体转变过程中, 马氏体体积百分数为

$$\xi = \frac{1}{2} \{ \cos[a_M(T - M_f) + b_M\sigma] + 1 \} \quad (5.4)$$

式中, M_f 为马氏体转变结束温度($^{\circ}\text{C}$)

$$a_M = \pi / (M_s - M_f)$$

$$b_M = -a_M / C_M$$

式中, M_s 为马氏体转变开始温度($^{\circ}\text{C}$); C_M 为 M_s 与应力的等效转换系数。

T 的变化应该在 $[M_f, M_s]$ 区间内, 且

$$M_f < M_s$$

升温过程中, 即马氏体向奥氏体转变过程中, 马氏体体积百分数为

$$\xi = \frac{1}{2} \{ \cos[a_A(T - A_s) + b_A\sigma] + 1 \} \quad (5.5)$$

式中, A_s 为奥氏体转变开始温度($^{\circ}\text{C}$)

$$a_A = \pi / (A_f - A_s)$$

$$b_A = -a_A / C_A$$

式中, A_f 为奥氏体转变结束温度($^{\circ}\text{C}$); C_A 为 A_s 与应力的等效转换系数。

T 的变化应该在 $[A_s, A_f]$ 区间内, 且

$$M_s < A_s < A_f$$

在 T 小于 A_s 时, SMA 丝可在一定预应力 σ 的作用下被拉长, 产生塑性变形。SMA 加热恢复到变形前的状态是由马氏体向奥氏体的转变过程。设整个过程 σ 保持不变, 且小于 SMA 最大恢复力, 将式(5.5)对温度求导可得

$$\frac{d\xi}{dT} = \frac{-1}{2} \sin[a_A(T - A_s) + b_A\sigma] a_A \quad (5.6)$$

联立式(5.6)和式(5.2)可得

$$D_s \frac{d\epsilon_{\text{SMA}}}{dT} = -\frac{\Omega}{2} \sin[a_A(T - A_s) + b_A\sigma] a_A + \Theta \quad (5.7)$$

针对升温过程, $T \in [A_s + \frac{\sigma}{C_A}, A_f]$, $\frac{\sigma}{C_A}$ 是由于外拉力 σ 引起的 A_s 变化, 积分式(5.7)

可得

$$\epsilon_{\text{SMA}} = \frac{-\epsilon_L}{2} \{ \cos[a_A(T - A_s) + b_A\sigma] - 1 \} + \frac{\Theta}{D_s} \left(T - A_s - \frac{\sigma}{C_A} \right) \quad (5.8)$$

其中

$$\epsilon_L = -\frac{\Omega}{D_s}$$

ϵ_L 为合金丝不发生不可恢复变形情况下的最大收缩率。由于实际应用中 σ 对 SMA 的收缩率影响较小, Θ 相比 D_s 也很小, 所以式(5.8)可简化为

$$\epsilon_{SMA} = \frac{-\epsilon_L}{2} \{ \cos[a_A(T - A_s)] - 1 \} \quad (5.9)$$

从式(5.9)可知, 升温中, 当 T 大于 A_s 时, SMA 体转变, 长度开始缩短, ϵ_{SMA} 开始增加; 当 T 等于 A_f 时, 马氏体体积百分数 $\xi=0$, 奥氏体体积百分数为 100%, 同时 ϵ_{SMA} 达到最大, 则 SMA 丝恢复到变形前状态。

当降温时, SMA 由奥氏体向马氏体转变。同样设整个过程 σ 保持不变, 且小于 SMA 最大恢复力, 将式(5.4)对温度求导可得

$$\frac{d\xi}{dT} = \frac{-1}{2} \sin[a_M(T - M_f) + b_M\sigma] a_M \quad (5.10)$$

联立式(5.10)和式(5.2)可得

$$D_s \frac{d\epsilon_{SMA}}{dT} = -\frac{\Omega}{2} \sin[a_M(T - M_f) + b_M\sigma] a_M + \Theta \quad (5.11)$$

针对降温过程, $T \in [M_f + \frac{\sigma}{C_M}, M_s]$, $\frac{\sigma}{C_M}$ 是由于外拉力 σ 引起的 M_f 变化, 积分式(5.11), 并采用与式(5.8)同样的简化方法, 可得

$$\epsilon_{SMA} = \frac{-\epsilon_L}{2} \{ \cos[a_M(T - M_f)] - 1 \} \quad (5.12)$$

从式(5.12)可知降温中, 当 T 小于 M_s 时, SMA 开始从奥氏体向马氏体转变, 长度开始变长, ϵ_{SMA} 开始减小; 当 T 等于 M_f 时, 马氏体体积百分数 $\xi=100\%$, 奥氏体体积百分数为 0, 同时 ϵ_{SMA} 变成 0, 则 SMA 丝再次被动拉伸到最长。

当 T 在 M_s 到 A_s 之间变化时, ϵ_{SMA} 基本保持不变。

例 5.1 绘图分析 TiNi-SMA 的温度与收缩率之间的关系。

考虑到 TiNi 合金丝的使用寿命, TiNi 合金丝收缩率 $\epsilon_L \leq 8\%$ 。

用 MATLAB 对 SMA 模型进行仿真和分析。开始时 SMA 丝在一定预应力的作用下被拉长。仿真得到的 SMA 丝收缩率和温度关系如图 5.42 所示。

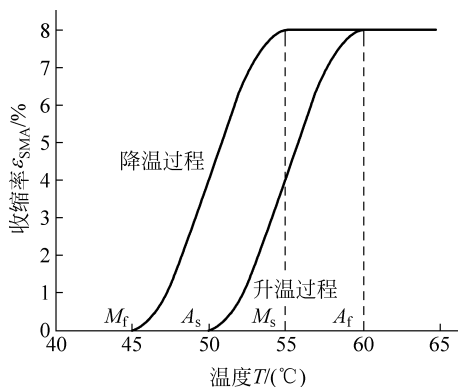


图 5.42 SMA 丝收缩率和温度关系

从图 5.42 可知,升温 and 降温过程曲线不重合,SMA 存在明显的滞后,称为迟滞性,对控制影响较大。

5.7.2 形状记忆合金丝的应用

形状记忆合金驱动器适合多种应用,例如锁闭释放机械装置、叶片定位、机器人动作等。驱动单元由一系列镍-钛(Nickel-Titanium)导线组成,其受热时将缩短。图 5.43 所示为一种形状记忆合金丝驱动器,动作时间依赖于输入功率的大小,大约在 25ms,还取决于不同的电流和负载因素。

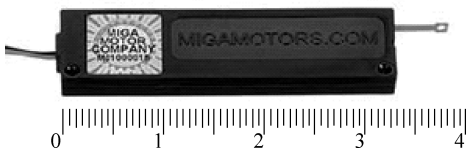


图 5.43 形状记忆合金驱动器示例

记忆合金在日常生活应用也较多。利用形状记忆合金弹簧可以控制浴室水管的水温,在热水温度过高时通过“记忆”功能,调节或关闭供水管道,避免烫伤,如图 5.44 所示。

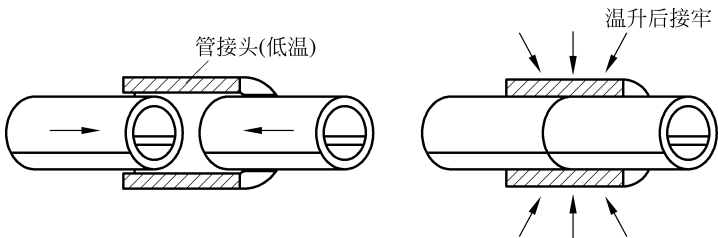


图 5.44 形状记忆合金接头

作为一类新兴的功能材料,记忆合金的很多新用途正不断被开发,例如用记忆合金制作的眼镜架,被碰弯曲后,只要将其放在热水中加热,就可以恢复原状。

记忆合金在航空航天领域内的应用有很多成功的范例,如图 5.45 所示。人造卫星上庞大的天线可以用记忆合金制作。发射人造卫星之前,将抛物面天线折叠起来装进卫星体内,火箭升空把人造卫星送到预定轨道后,只需加温,折叠的卫星天线因具有“记忆”功能而自然展开,恢复抛物面形状。

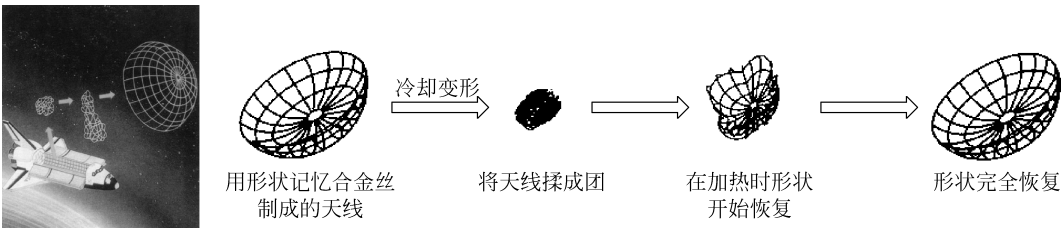


图 5.45 记忆合金太空天线

记忆合金在临床医疗领域内有着广泛的应用,例如人造骨骼、伤骨固定加压器、牙科正畸器、各类腔内支架、栓塞器、心脏修补器、血栓过滤器、介入导丝和手术缝合线等,记忆合金在现代医疗中正扮演着不可替代的角色。SMA 也可用于开发灵巧的机械手指。

用溅射法形成的形状记忆合金薄膜拥有以往压电元件 15 倍以上的驱动力、50 倍以上的位移量,可作为带动数毫米微小机械的驱动元件。形状记忆合金薄膜也可用于研制仿生机器人的翅膀。

5.8 人工肌肉驱动器

5.8.1 气动肌肉

气动肌肉出现于 20 世纪 50 年代,最初用于帮助残疾人进行上肢的辅助和康复运动。气动肌肉充气时,气动肌肉收缩,输出轴向拉力,带动关节转动,有优良的柔顺性。由于气动肌肉只可单向输出拉力,为使关节双向(bidirectional)转动,通常采用拮抗(antagonistically)安装的气动肌肉驱动仿生关节。气动肌肉可以提供很大的力量,而重量却比较小。多个气动肌肉可以按任意方向、位置组合,不需要整齐的排列。典型的气动肌肉如图 5.46~图 5.49 所示。

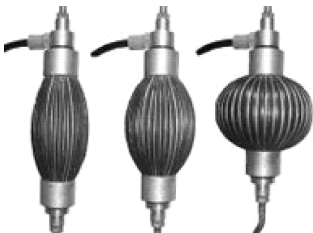


图 5.46 气动肌肉示例

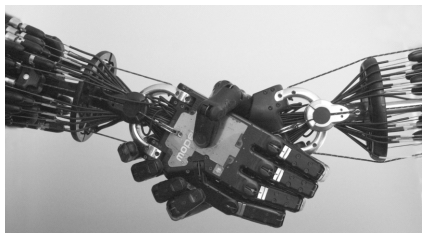


图 5.47 气动肌肉机器人灵巧手示例

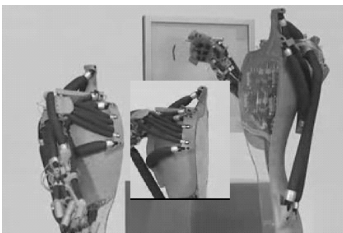


图 5.48 气动肌肉仿人手臂示例

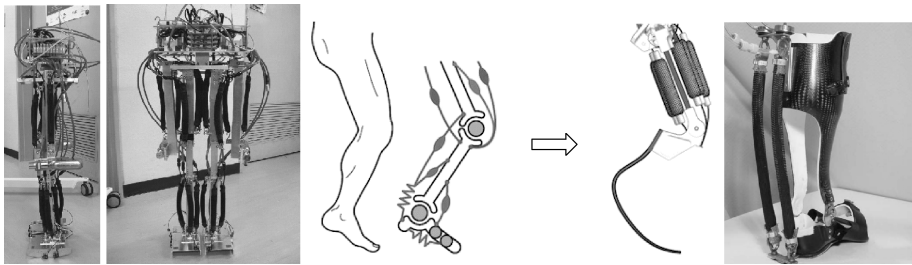


图 5.49 气动肌肉仿生腿示例

由于气体的可压缩性等原因,气动人工肌肉位置精度不高。气动肌肉与生物肌肉在驱动特性上还有差距,尤其是特性相对固定,不可进行调节。

5.8.2 电活性聚合物人工肌肉

电子型人工肌肉包括电介质弹性体、压电聚合物、铁电体聚合物、电致伸缩弹性体、液晶弹性体等。

电活性聚合物(electroactive polymer, EAP)可产生的应变比电活性陶瓷大两个数量级,并且较形状记忆合金响应速度快、密度小、回弹力大,另外具有类似生物肌肉的高抗撕裂强度及固有的振动阻尼性能等。电活性聚合物驱动材料是指能够在电流、电压或电场作用下产生物理形变的聚合物材料,其显著特征是能够将电能转化为机械能。根据形变产生的机制,电活性聚合物人工肌肉材料可以分为电子型和离子型两大类。电子型 EAP 通过分子尺寸上的静电力,或称库仑力(coulomb)作用使聚合物分子链重新排列以实现体积上各个维度的膨胀和收缩。这种电动机械转化是一种物理过程,包括两种机制:电致伸缩效应和 Maxwell 效应。

电活性陶瓷是人工肌肉的另一个备选材料,其响应速度较形状记忆合金快,但是脆性大,只能获得小于 1% 的应变。

5.8.3 离子交换膜金属复合材料

离子肌肉种类繁多,但总体说来离子能量效率相对较低,即便是在最佳条件下还不到 30%,而一些电子肌肉却可以达到 80%。尽管如此,离子肌肉却有其不可替代的优势:响应电压可以低至 1~7V,电子肌肉则每微米厚需要数十甚至上百伏特的电压;离子肌肉能产生弯曲运动,而不仅仅是伸展或收缩。离子型人工肌肉产生驱动的方式是体系中离子的移动。施加电场促使离子和溶剂移动,离子进入和离开的聚合物区域便发生膨胀和收缩。当然离子运动的前提是必须处于电离状态,所以一般须使体系保持液体状态。但是,随着技术的发展,离子人工肌肉开始脱离液体环境工作。

离子型人工肌肉包括离子交换膜金属复合材料、聚合物凝胶、导电聚合物、碳纳米管复合材料、电流变液等。

离子交换膜金属复合材料(ionic polymer metal composite, IPMC)是一种新型的智能材料,致动性能非常类似于生物肌肉,是一种适合开发仿生机器人的材料。与常规材料制成的致动机构相比,IPMC 能提供很高的化学能转换为机械能的变换效率。

与常规的致动器相比,IPMC 能制成简单、轻质、低功率刮擦机构,尤其是当给定大约 0.3Hz 的激励信号时,IPMC 能产生大于 90° 的弯曲,其弯曲方向取决于所施加信号的极性。IPMC 可用于火星车去除灰尘,将 IPMC 刮尘器放置在观察窗的外面,使其向内移动以清洁窗口。

聚电解质(聚合物)凝胶可以随着环境(例如温度、溶剂组成、离子强度、pH 值及电场)的改变而溶胀或收缩。凝胶体积改变的本质是凝胶网络对水或其他溶剂的吸收和排出。

5.8.4 导电聚合物人工肌肉

导电聚合物是分子链中含有 π 共轭体系结构的聚合物,经化学掺杂或电化学掺杂,可在绝缘体—半导体—导体之间进行转变。导电聚合物在氧化还原掺杂过程中还会发生长度、体积、颜色和力学等性能的可逆转变,可利用这一可逆性能转变设计成一系列的功能性电化学器件,例如电致变色显示器、电化学传感器、人工肌肉等。

传导离子的聚合物凝胶是第一代人工肌肉,传导电子的导电聚合物为第二代人工肌肉。其特点是驱动电压低、响应时间长、收缩速率慢、伸缩率大、产生应力大、功率密度大、重复精度高、疲劳寿命长。导电聚合物人工肌肉的响应时间为1~50s,远大于生物肌肉(10~100ms)。

与压电材料及电致伸缩材料相比,导电聚合物驱动电压极低,几伏甚至几十毫伏就可使其尺寸发生10%的线性变形。而离子交换聚合物金属复合材料(IPMC)驱动电压一般为4~7V。相对其他材料而言,导电聚合物如此低的驱动电压在人工肌肉的应用上是一大优势。导电聚合物人工肌肉能达到的最大收缩速率为每秒4%。而相应的哺乳动物骨骼肌收缩速率可高达每秒100%。

导电聚合物人工肌肉作为致动装置时测得的线性伸缩率为1%~10%,相对天然肌肉的20%~30%要小许多。对于双层导电聚合物膜而言,若其体积膨胀10%,则相应产生的双层应力约20MPa。天然肌肉的功率密度为40~1000W/g,且随自身重量增加,功率密度下降。而导电聚合物人工肌肉接近或超过天然肌肉的功率密度,约为1000W/cm³。

导电聚合物可用于开发人脸。导电聚合物机器人脸部能按照指令完整地模仿并表达人类的28种面部表情,而且还会随着年龄的变化而出现皱纹,如图5.50所示。



图 5.50 人工肌肉机器人脸示例

5.8.5 碳纳米管人工肌肉

大多数材料在被拉往一个方向时,另一方向就会变薄,类似于橡皮筋被伸展时的表现。普通材料在拉伸时会横向收缩,这种现象可通过泊松比来量化。但“巴克纸”碳纳米管(carbon nano tube,CNT)在伸展时可增加宽度,在均匀压缩时长度和宽度均可增加,如图5.51和图5.52所示。具有这些性能的材料可用于制作复合材料、人工肌肉、密封垫圈或传感器。

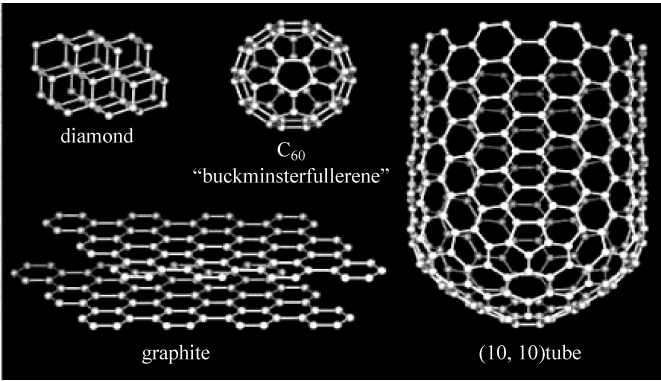


图 5.51 纳米碳管

碳纳米管是由石墨中一层或若干层碳原子卷曲而成的笼状“纤维”。管身由六边形碳环微结构单元组成,端帽部分由含五边形碳环组成的多边形结构,是一种纳米级的一维量子材料。

碳纳米管通常分单壁和多壁两种,单壁碳纳米管可以认为是单层石墨卷成柱形结构,而多壁碳纳米管可以认为是不同直径的单壁碳纳米管嵌套而成。碳纳米管具有很高的驱动应力(26MPa)和极高的拉伸强度(37GPa),并能够提供超高的工作强度和机械强度,其杨氏模

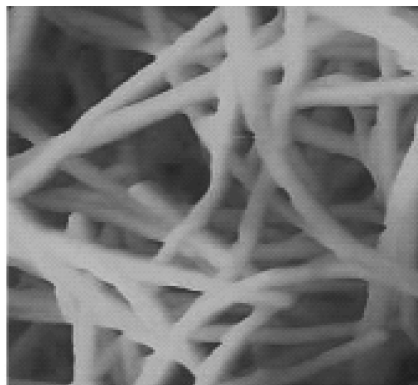


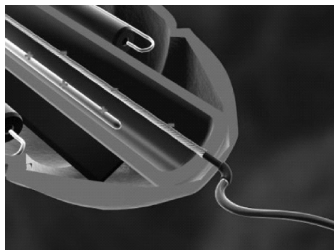
图 5.52 巴克纸中的多壁碳纳米管原子力显微镜图

量可达 640GPa。除此之外,在 1000℃ 以下碳纳米管具有高的热稳定性。通过模拟表明其应变可达 1%,极限能量密度可达 15 000J/kg。

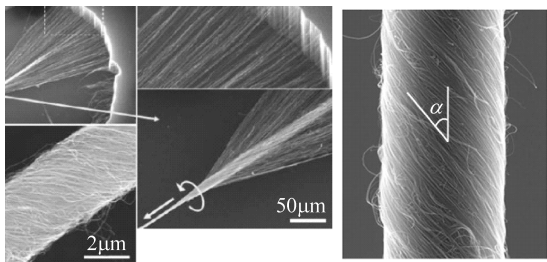
例 5.2 举例说明碳纳米管在纳米运动中的应用。

随着科技的发展,纳米机器人成为现实。纳米机器人可在人体的血液中移动,找到病灶,治愈疾病。纳米机器人不能只随着血液流动,合适的推进方式是研究的难点。科学家发明了新型人工肌肉——鞭毛驱动技术,如图 5.53(a)所示。

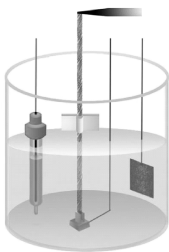
用纳米碳管“纱线”旋转缠绕可制成人工肌肉,如图 5.53(b)和图 5.53(c)所示。当浸泡在电解液中时,加电后碳管会吸附电解质导致体积增大,人工肌肉麻绳就会开始旋转。这种旋转可以达到每分钟 600 转的速度。一旦停止加电,人工肌肉会把之前吸附的电解质释放出来,体积慢慢减小,反向转回原位。因此把这种人工肌肉装在纳米机器人体内,末端加上一根鞭毛,然后给人工肌肉加电、撤电、再加电,机器人就会像蝌蚪一样游动起来。



(a) 微型机器人



(b) 碳纳米管人工肌肉



(c) 碳纳米管原理

图 5.53 人工肌肉示意图

2012年,科学家发明了由石蜡填充的碳纳米管纤维制造的人工肌肉,这种人工可以驱动超过自身重量10万倍的重物,并提供超过天然骨骼肌85倍以上的机械功率。石蜡填充的碳纳米管人工肌肉由两部分组成:一部分为经过特殊编织形成一种特殊结构的碳纳米管纤维;另一部分为体积能够变化的石蜡。将石蜡嵌入碳纳米管纤维中,通过直接加热、电加热,或者使用一道闪光,石蜡就会发生体积膨胀,从而使整个“肌肉”膨胀。但由于碳纳米管纤维特殊的结构,“肌肉”的长度却会与此同时发生收缩,输出驱动力。

5.9 小结

驱动器作为运动的动力源,其原理和方式直接决定了运动控制性能。致动方式的本质是能量的传递和转换,自然科学所涉及的静电、电磁、相变、热机、压电、形状记忆、磁致伸缩、电致动、磁流体动力、电流变和磁流变以及生物肌肉都可用来开发驱动器。而后分别阐述了直流伺服电动机、交流伺服电动机、直线电动机的基本知识;液压驱动系统和气压驱动系统也是目前工业领域成熟的驱动模式;介绍了可用于特殊领域的压电陶瓷驱动、形状记忆合金驱动、气动人工肌肉驱动,以及目前还处于实验室研究阶段的电活性聚合物、离子交换膜金属复合材料、导电聚合物人工肌肉和碳纳米管等新兴人工肌肉驱动器;介绍MR阻尼器在运动调节中的应用;电动机只是驱动动力单元,需要配合减速、传动和驱动放大器工作。

习题

- 5.1 名词解释:制动器、致动器、换能器、驱动放大器。
- 5.2 三相永磁同步电动机的转子装有转子永磁体位置检测器,用途是什么?对于控制系统有何作用?
- 5.3 对比分析形状记忆合金丝驱动器、气动肌肉驱动器和电动机驱动器之间的优劣。
- 5.4 对比分析液压驱动器、气压驱动器和电动机驱动器之间的优劣。
- 5.5 驱动器的刚度的含义是什么?刚度对位置控制精度和柔顺性的影响是什么?
- 5.6 对比分析直流伺服电动机和交流伺服电动机的优缺点。
- 5.7 日常生活中常见的驱动器有哪些?举例说明。
- 5.8 观察日常生活中的运动控制或其他调节系统,发现身边可见的致动效应。
- 5.9 分析哪些致动效应是双向的,即具有正效应和逆效应,从而即可以做驱动器,也可以做传感器。
- 5.10 填空题。
 - (1) 交流伺服电动机主要由_____和_____组成。
 - (2) PMSM电动机的全称是_____。
 - (3) PMSM电动机主要由_____,_____,_____和_____。
 - (4) PMSM电动机转子有_____,_____和_____3种。
 - (5) 一台500r/min、50Hz的同步电动机,其极对数是_____。