

第 3 章 工业机器人的动力系统

工业机器人的动力系统是其核心组成部分，为机器人提供必要的动力和能量以实现各种动作与功能。根据控制系统发出的指令信号，动力系统借助动力元件使工业机器人完成预设的工作任务。本章首先对工业机器人的动力系统进行概述，然后详细探讨电动驱动、液压驱动和气动驱动等关键技术。

3.1 动力系统的分类

工业机器人动力系统的分类主要按照动力源的不同来划分，常见的可分为电动驱动系统、液压驱动系统和气动驱动系统。电动驱动系统又可以根据电动机的类型进一步细分为直流伺服和交流伺服两类。同时，根据控制器实现方式的不同，电动驱动系统又可以分为模拟伺服和数字伺服两类。另外，根据控制器中闭环的数量，电动驱动系统还可以划分为开环控制系统、单环控制系统、双环控制系统及多环控制系统。

1. 电动驱动系统

工业机器人的电动驱动系统是一种以电动机为动力源，通过传动机构将电能转换为机械能，从而驱动机器人运动的系统。电动驱动系统是现代工业机器人中最常用的动力系统之一，具有技术成熟、控制灵活、维护方便等优点。电动驱动系统主要由电动机、传动机构和控制器等组成。其中，电动机是电动驱动系统的核心部件，常用的电动机类型包括直流伺服电动机、交流伺服电动机和步进电动机等；传动机构用于将电动机的高速旋转转换为机器人相应的低速旋转，常用的传动机构包括减速器、联轴器等；控制器负责控制电动机的转速、转向和位置等参数，实现对机器人运动的精确控制。

步进电动机驱动系统的特点如下。

步进电动机驱动系统是一种将电脉冲信号转换为角位移或线位移的开环控制系统。它主要由步进电动机和步进驱动器两部分组成。步进电动机是一种特殊的电动机，其旋转是以固定的角度（步距角）一步一步运行的。在非超载情况下，电动机的转速、停止的位置只取决于电脉冲信号的频率和脉冲数，而不受负载变化的影响，因此，它具有较高的定位精度。步进驱动器（也称步进驱动电源）的作用是为步进电动机的绕组提供脉冲电流。步进电动机的运行性能取决于其与步进驱动器的良好配合。步进电动机驱动系统的主要优点如下。

(1) 精准控制。步进电动机可以通过输入不同数量和频率的电脉冲信号来控制转子角度的变化，从而实现精确控制。每个电脉冲信号都会使步进电动机转子旋转一个固定角度（通常为 1.8° 或 0.9° ），因此可以实现高精度位置控制。

(2) 高效能转换。步进电动机在工作时不需要传统的直流或交流电源, 而是通过电脉冲信号来驱动的。这种驱动方式可以提高能量的利用效率, 降低能量损耗, 并且使得步进电动机在低速和静止状态下具有较大的力矩。

(3) 可靠性高。步进电动机的控制可靠性对保证自动控制系统的正常工作极为重要, 它不易发生故障。

(4) 易于控制。步进电动机可以用数字信号直接进行开环控制, 整个系统简单、廉价。

(5) 响应速度快。步进电动机的启动、停止和反向均能连续、有效的进行, 具有良好的响应特性。

(6) 正/反转特性相同。步进电动机的正/反转特性相同, 且运行特性稳定。

步进电动机也存在一些缺点, 如效率低、带负载惯量的能力不强、功率小等。虽然近年来不断有小体积大功率的步进电动机出现, 但其价格比较昂贵。

电气伺服系统的特点如下。

伺服系统 (又称随动系统) 是一种用来精确地跟随或复现某个过程的反馈控制系统, 其主要任务是根据控制命令的要求, 对功率进行放大、变换与调控等处理, 使驱动装置输出的力矩、速度和位置控制非常灵活、方便。伺服系统主要由控制器、功率驱动装置、反馈装置和电动机等部分组成。电气伺服系统是一种自动化运动控制装置, 主要用于精确地对机械部件的位置、方位、状态等进行控制。电气伺服系统决定了自动化机械的精度、控制速度和稳定性, 是工业自动化设备的核心。电气伺服系统主要由伺服驱动器、伺服电动机和编码器 3 部分组成。伺服驱动器负责将从控制器收到的信息分解为单个自由度系统能够执行的命令, 并传递给执行机构 (伺服电动机); 伺服电动机将收到的电流信号转换为转矩和转速以驱动控制对象, 实现每个关节的角度、角速度和转矩的控制; 编码器作为电气伺服系统的反馈装置, 在很大程度上决定了电气伺服系统的精度。编码器安装在伺服电动机上, 与伺服电动机同步旋转。伺服电动机转一圈, 编码器也转一圈, 转动的同时将编码信号送回控制器, 控制器据此判断伺服电动机的转向、转速、位置。

伺服电动机的分类如图 3.1 所示。

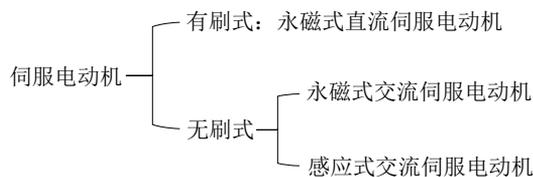


图 3.1 伺服电动机的分类

永磁式直流伺服电动机的剖面图如图 3.2 (a) 所示, 其特点是永久磁铁位于外部, 而电枢线圈位于内部, 这样的结构使得散热变得相对困难, 因此降低了功率体积比。当将这种电动机应用于直接驱动系统时, 由于热传导的影响, 可能会导致传动轴 (如导螺杆) 发生热变形。但对交流伺服电动机而言, 无论是永磁式或感应式, 其产生旋转磁场的电枢线圈均置于电动机的外层, 如图 3.2 (b) 所示, 因而其散热较佳, 有较高的功率体积比, 且适用于直接驱动系统。

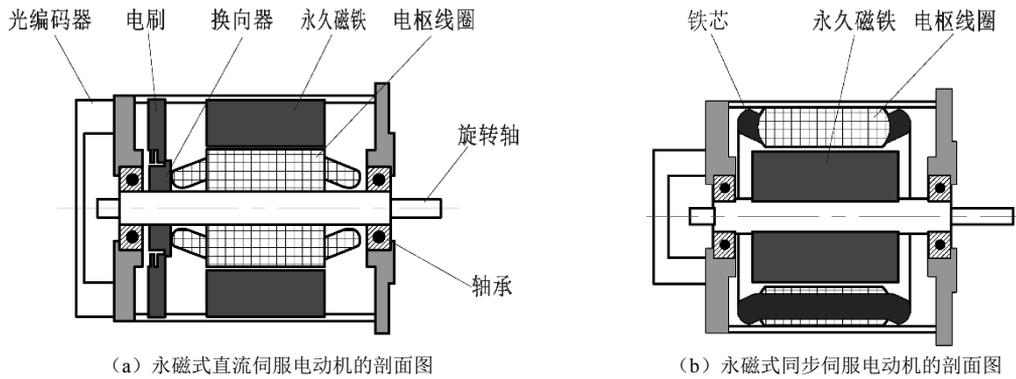


图 3.2 伺服电动机的剖面图

无刷式伺服电动机主要可分为两大类（见图 3.1）：永磁式交流伺服电动机和感应式交流伺服电动机。

随着技术的进步，近年来，交流伺服电动机正逐渐取代直流伺服电动机而成为工业机器人的主要驱动器。目前，一般永磁式交流伺服电动机的回接组件多采用解角器或光电编码器，前者可测量转子的绝对位置，而后者则只能测量转子的相对位置，电子换相设计于驱动器内。

相对于步进电动机驱动系统，直流伺服电动机驱动系统和交流伺服电动机驱动系统有其自身的特点，如表 3.1 所示。

表 3.1 常用电动驱动系统特点比较

分 类	步进电动机驱动	直流伺服电动机驱动和交流伺服电动机驱动
力矩范围	中、小力矩（一般在 20N·m 以下）	小、中、大，全范围
转速范围	低（一般在 2000r/min 以下，大力矩电动机低于 1000r/min）	高（可达 5000r/min），直流伺服电动机可达 $(1\sim 2)\times 10^4\text{r/min}$
控制方式	主要是位置控制	多样化、智能化的控制方式，位置、转速、转矩方式
平滑性	低速时有振动（但用细分型驱动器可明显改善）	好，运行平滑
精度	一般较低，细分型驱动时较高	高（具体要看反馈装置的分辨率）
矩频特性	高速时，力矩下降快	力矩特性好，特性较硬
过载特性	过载时会失步	可 3~10 倍过载（短时）
反馈方式	大多数为开环控制，也可接编码器，以防止失步	闭环方式，编码器反馈
编码器类型	一般	光电型旋转编码器（增量型/绝对值型），旋转变压器型
响应速度	一般	快
耐振动	好	一般（旋转变压器型可耐振动）
温升	运行温度高	一般
维护性	基本可以免维护	较好
价 格	低	较高

2. 液压驱动系统

液压驱动系统是一种通过液体压力能的变化来传递能量并控制机械运动的系统。在液压

驱动系统中, 动力装置提供的液体压力能通过控制阀和管路传递到液压执行机构, 进而将液体的压力能转换为机械能, 驱动工作机构实现直线运动或回转运动。图 3.3 所示为几种典型的液压元件。



图 3.3 几种典型的液压元件

液压驱动系统的主要优点如下。

(1) 驱动力矩大。液压驱动系统能够输出非常大的推力力矩, 因此广泛应用于重型机械设备, 如重型机床和起重机等。

(2) 功率质量比大。液压驱动系统在传递相同功率的情况下, 其体积和质量相对较小, 因此具有更大的功率质量比。

(3) 工作平稳可靠。液压驱动系统的工作过程平稳, 且由于液体的压缩性较低, 因此具有更高的工作可靠性。

(4) 系统响应速度快。液压驱动系统的调速范围大, 灵活性高, 能够实现快速启动、制动和换向。

(5) 易于实现自动控制。液压驱动系统可以通过控制阀和管路方便地调节液体的流量与压力, 从而实现对执行机构的精确控制。

然而, 液压驱动系统也存在如下一些缺点。

(1) 成本高。液压驱动系统的制造和维护成本相对较高, 因为它需要高精度的液压元件和清洁的工作环境。

(2) 质量大。由于需要使用液压油和较大的液压缸, 因此液压驱动系统的质量相对较大。

(3) 工艺复杂。液压驱动系统的设计和制造过程相对复杂, 需要专业的技术人员和设备。

(4) 可能发生泄漏。液压驱动系统存在油液泄漏的风险，这可能会影响系统的效率和精度，甚至可能对环境造成污染。

3. 气动驱动系统

气动驱动系统利用压缩空气作为动力源来驱动机械设备运动。它主要由气液转换器、工作台和控制逻辑阀组成。当压缩空气进入气液转换器时，压缩空气推动气液转换器内的活塞做往复运动，进而通过连接杆驱动工作台做直线往复运动。控制逻辑阀用于控制压缩空气的流向和流量，从而实现对工作台运动速度和行程的精确控制。图 3.4 展示了几种典型的气动元件。气动伺服系统一般采用压缩气体作为动力的驱动能源。由于它传递力的介质是空气，因此它以其价格低廉、干净、安全等许多特点而获得广泛应用。气动驱动系统的具体优点如下。

(1) 结构简单、成本低。气动驱动系统相较于液压驱动系统和电动驱动系统，其结构更简单，制造成本也相对较低。

(2) 无污染、易于实现无级变速。由于它使用空气作为传动介质，因此气动驱动系统不会产生废液或废热，对环境无污染。此外，气体的黏性小、流速高、阻力损失小，因此容易实现无级变速。

(3) 响应速度快、维修方便。气动驱动系统的响应速度快，可以在中、低负载的机器人中广泛应用。同时，其维修也相对方便。

(4) 安全性高。气动驱动系统具有防火、防爆的特点，可以在高温环境下工作。

气动驱动系统的缺点为速度控制困难、定位精度低、工作稳定性差等。由于空气的可压缩性和不易密封性，气动驱动系统难以实现精确的速度控制和定位控制。此外，气动推力较小，只适用于小功率传动。

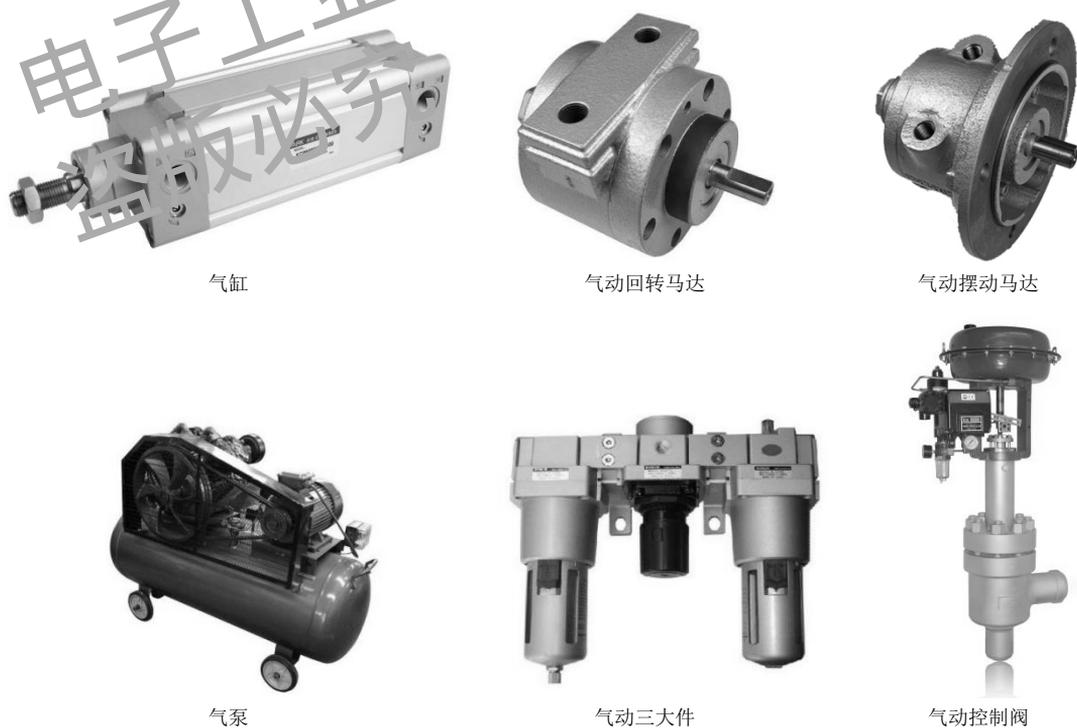


图 3.4 几种典型的气动元件

4. 3 种驱动方式的比较

以上工业机器人的 3 种驱动方式适用于不同的应用场景。在设计工业机器人的驱动器时, 应根据具体需求选择合适的驱动方式。关于这 3 种驱动方式的详细比较, 可参考表 3.2。

表 3.2 3 种驱动方式的比较

内 容	驱 动 方 式		
	液 压 驱 动	气 动 驱 动	电 动 驱 动
输出功率	很大, 压力范围为 50~140Pa	大, 压力范围为 48~60Pa	较大
控制性能	利用液体的不可压缩性, 控制精度较高, 输出功率大, 可无级变速, 反应灵敏, 可实现连续轨迹控制	气体压缩性强, 精度低, 阻尼效果差, 低速不易控制, 难以实现高速、高精度的连续轨迹控制	控制精度高, 功率较大, 能精确定位, 反应灵敏, 可实现高速、高精度的连续轨迹控制, 伺服特性好, 控制系统复杂
响应速度	很快	较快	很快
结构性能及体积	结构适当, 执行机构可标准化、模拟化, 易实现直接驱动。功率质量比大, 体积小, 结构紧凑, 密封问题较大	结构适当, 执行机构可标准化、模拟化, 易实现直接驱动。功率质量比大, 体积小, 结构紧凑, 密封问题较小	伺服电动机易于标准化, 结构性能好, 噪声小, 电动机一般需要配置减速装置, 除直流电动机外, 难以直接驱动, 结构紧凑, 无密封问题
安全性	防爆性能较好, 用液压油作为传动介质, 在一定条件下有发生火灾的危险	防爆性能好, 压力高于 100kPa 时应注意设备的抗压性	设备自身没有发生爆炸和火灾的危险, 直流有刷电动机换向时有火花, 防爆性能差
对环境的影响	液压系统易漏油, 并不常有污染	排气时有噪声	无
应用范围	适用于重载、低速驱动, 电液伺服系统适用于喷涂机器人、点焊机器人和搬运机器人	适用于中/低负载驱动、对精度要求较低的有限点位程序控制机器人	适用于中/低负载、要求具有较高的位置控制精度和轨迹控制精度、速度较高的机器人, 如 AC 伺服喷涂机器人、点焊机器人、弧焊机器人等

3.2 交流伺服系统

工业机器人的交流伺服系统是其核心控制系统之一, 用于实现机器人运动的高精度、高速和高效控制。该系统主要由交流伺服电动机、伺服驱动器和控制器等部分组成。交流伺服电动机是交流伺服系统的关键部件, 通常采用永磁 (永磁式) 同步电动机。这种电动机具有高效率、高功率密度和高精度等特点, 能够满足机器人对速度和位置控制的严格要求。伺服驱动器负责将控制器发出的指令信号转换为电动机可以接收的电流和电压信号, 从而实现对电动机的精确控制。控制器根据机器人的运动轨迹、速度和加速度等要求生成相应的控制信号, 发送给伺服驱动器。

在工业机器人中, 交流伺服系统通常采用闭环控制方式, 通过反馈装置实时检测机器人的实际位置和速度等, 与控制器发出的指令信号进行比较和修正, 从而实现对机器人运动的高精度控制。此外, 随着技术的不断发展, 现代工业机器人的交流伺服系统还具备自适应控制、智能控制等高级功能, 能够根据机器人的运动状态和环境变化自动调整控制参数, 进一

步提高机器人的运动性能和稳定性。

工业机器人的交流伺服系统的发展方向主要包括以下几方面。

(1) 高速、高精度、高性能化。随着工业机器人在各个领域的应用不断扩大,对机器人的运动性能要求也越来越高。因此,工业机器人的交流伺服系统需要不断提高电动机的转速、控制精度和动态响应性能,以满足更高速、更精确、更稳定的运动控制需求。

(2) 智能化。随着人工智能技术的不断发展,工业机器人的智能化水平也在不断提高。交流伺服系统也需要具备自适应控制、智能控制等高级功能,能够根据机器人的运动状态和环境变化自动调整控制参数,实现更智能、更灵活的运动控制。

(3) 小型化、轻量化。随着工业机器人向小型化、轻量化方向发展,交流伺服系统也需要不断减小体积、减轻质量,以适应更紧凑、更灵活的机器人结构。

(4) 模块化、标准化。为了方便用户的使用和维护,工业机器人的交流伺服系统需要逐步实现模块化、标准化,使得不同型号的机器人可以方便地更换、升级交流伺服系统,提高系统的通用性和互换性。

(5) 绿色化、节能环保。随着人们环保意识的不断提高,工业机器人的交流伺服系统也需要注重绿色化、节能环保,采用更环保的材料、更节能的控制算法,降低机器人的能耗和排放,实现可持续发展。

工业机器人的伺服控制策略可以根据不同的应用需求和场景来选择。以下是一些常见的伺服控制策略。

(1) 位置控制。位置控制是最常见的伺服控制策略之一。它通过外部输入的脉冲频率来确定转速,而脉冲数则用来确定转动的角度。位置控制可以实现精确定位,适用于需要高精度运动控制的场景,如数控机床、印刷机械等。

(2) 速度控制。速度控制这种伺服控制策略主要通过模拟量的输入或脉冲的频率来实现对伺服电动机速度的控制。速度控制适用于对机器人运动速度有明确要求的场景。

(3) 转矩控制。转矩控制主要通过外部模拟量的输入或直接地址赋值来设定电动机轴对外输出的转矩大小。这种伺服控制策略适用于需要恒定转矩的场景,如在缠绕和放卷的装置中,用于防止由于物料变化而改变受力状态。

(4) 矢量控制。矢量控制是一种高性能的伺服控制策略,它通过控制电动机的电流矢量来实现对电动机转矩和磁通量的独立控制。矢量控制可以实现高精度的速度和位置控制,适用于对动态性能和精度要求较高的场景。

(5) 恒压频比控制。在工业控制领域,恒压频比控制是一种常见的伺服控制策略。它通过控制输出电压和频率来保持电动机的磁通量为定值,从而实现对电动机速度的控制。这种伺服控制策略适用于对动态性要求较低的场景。

除此之外,还有一些其他的伺服控制策略,如自适应控制、智能控制、模糊控制等,它们可以根据不同的应用场景和需求进行选择与组合,以实现更灵活、更智能、更稳定的运动控制。

3.2.1 伺服驱动器

伺服驱动器又称伺服控制器或伺服放大器,是一种用于控制伺服电动机的高性能控制器。它属于伺服系统的一部分,并广泛应用于工业机器人、数控加工中心等自动化设备中。伺服

驱动器的作用类似变频器对普通交流马达的作用，主要用于控制伺服电动机的位置、速度和力矩，以实现高精度的传动系统定位。如图 3.5 所示，交流伺服系统展现出电流反馈、速度反馈和位置反馈的三重闭环结构。在这里，电流环和速度环作为内环（局部环），而位置环则作为外环（主环）。电流环的主要任务是确保电动机绕组电流能够实时且精确地跟随电流指令信号，从而在动态过程中限制电枢电流不超过最大值，确保系统具有足够的加速转矩，进而提升系统的反应速度。速度环增强了系统对负载扰动的抵抗能力，抑制速度波动，实现稳态无静差。位置环直接关系到系统的静态精度和动态跟踪性能，是确保交流伺服系统稳定且高性能运行的关键设计要素。当传感器检测的是输出轴的速度、位置时，系统称为半闭环系统；当传感器检测的是负载的速度、位置时，系统称为闭环系统；当传感器同时检测输出轴和负载的速度、位置时，系统称为多重反馈闭环系统。

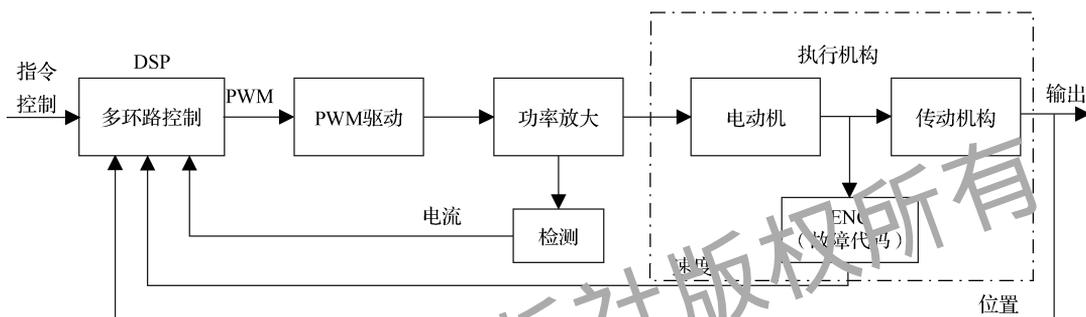


图 3.5 交流伺服系统

交流伺服驱动器的数字控制是指通过数字信号处理器 (DSP) 或微处理器来实现对伺服电动机的精确控制。与传统的模拟控制相比，数字控制具有更高的精度、更灵活的伺服控制策略和更强的抗干扰能力。

数字控制可以实现更高级的伺服控制策略，如矢量控制、自适应控制、智能控制等，以提高伺服系统的性能和稳定性。此外，数字控制还具备更好的可编程性和可扩展性，可以通过修改控制算法或增加功能模块来实现不同的控制需求。如图 3.6 所示，交流伺服驱动器的结构不仅消除了模拟控制分散性大、零漂、低可靠性等不足，还充分利用了数字控制在精度和灵活性上的优势，使得伺服驱动器的结构更为简洁，性能更加稳定可靠。

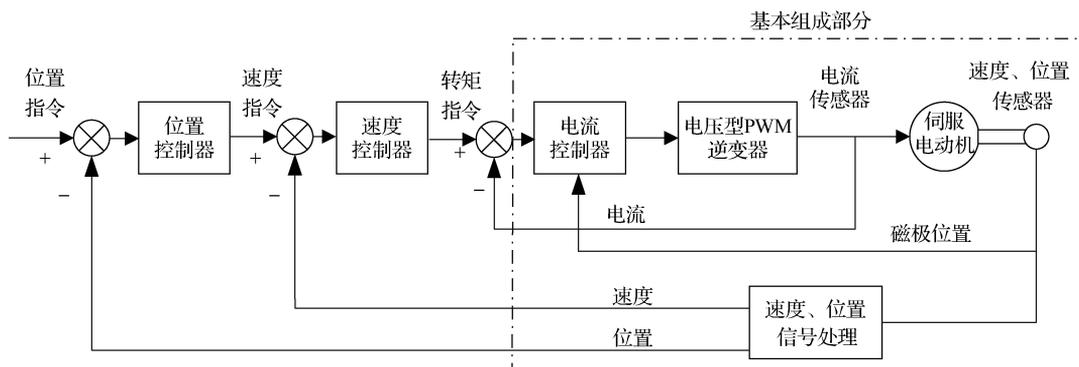


图 3.6 交流伺服驱动器的一般结构