



南京农业大学

机械电子学

Mechatronics

执行元件与功率驱动电路

安秋

南京农业大学工学院

执行元件的驱动与控制

- 概述
- 执行元件
- 功率器件
- 功率驱动电路
- 电磁阀
- 直流电动机
- 步进电动机

概述

- 在机电系统中，被控对象往往是**功率较大的驱动元件或设备**，如电磁阀、电动机等，这样就要用到功率驱动接口电路。
- 在测控系统（弱电控制强电）中，最终要控制的往往是**高电压、大电流或大功率**。
- 常用**功率器件**：半导体功率开关元件（晶闸管）和线性功率元件（功率晶体管、功率场效应晶体管和功率模块）。

执行元件或执行器

- 概念

- 执行元件或执行器或执行装置是位于功率转换及放大元件和被控制对象节点之间的一种能量转换装置，它能在控制装置的控制下，按照控制信号，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。

- 执行器的种类

- 按其动力能源形式分三大类：电动、液动和气动
- 按运动形式可分为：直线运动和旋转运动
- 按输入控制信号可分为：流体压力信号、直流电流信号、电通断信号、脉冲信号等



执行元件或执行器

电动执行器

- 电动机：电动机（英文：**Electric Motor**，俗称“马达”）是指依据电磁感应定律实现电能转换或传递的一种电磁装置。
- 螺线管（电磁线圈）可以用来操作气控阀或液压阀；由导线绕成的通常为长圆柱形的线圈。电流通过线圈时产生磁场(magnetic field)。此磁场能移动置于其轴线上的铁棒。螺线管常用于通过导通或切断电流的方式来操纵与铁棒相连接的机械阀门（继电器的加强版）。在大多数汽车中螺线管用于操纵给起动发动机供电的大电流开关。

执行元件或执行器

左力右电

电动机

Electric Motor

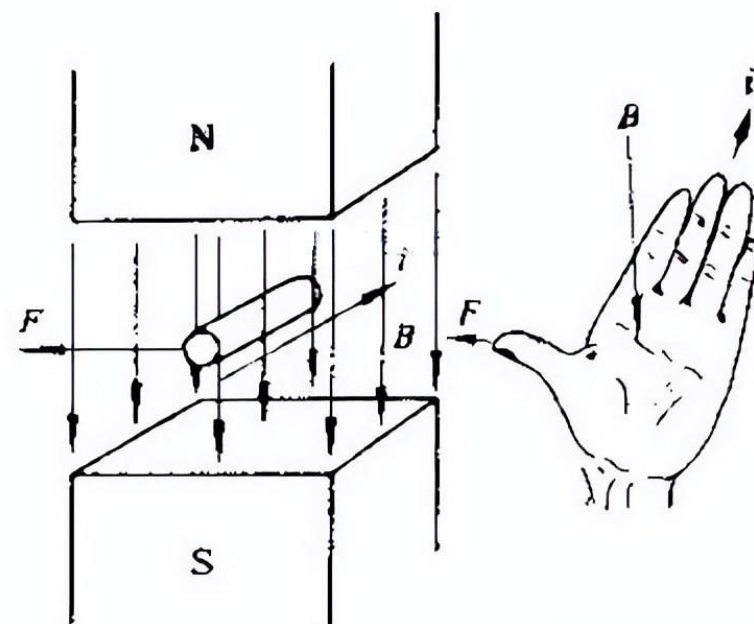
电动机是把电能转换成机械能的一种设备。它是利用通电线圈（也就是定子绕组）产生旋转磁场并作用于转子（如鼠笼式闭合铝框）形成磁电力旋转扭矩。

电动机使用了通电导体在磁场中受力的作用的原理，发现这一原理的是丹麦物理学与化学家—**奥斯特**（**电流磁效应**）。



英国电机工程师、物理学家**弗来明**左手定则

$$F = BIL \sin \theta$$

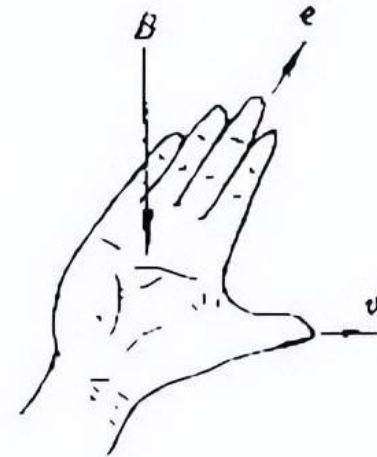
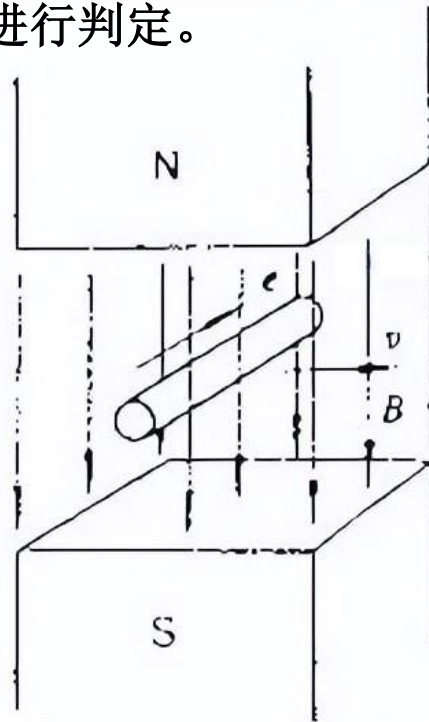


执行元件或执行器

电动机

Electric Motor

由于通电导体的运动会切割磁感线，此时就会产生感应电动势，那么感应电动势的方向就可以用右手定则进行判定。



$$E = vBl \sin \theta$$



英国电机工程师、物理学家弗来明右手定则（Fleming's right hand rule，又称发电机定则或右手定则）

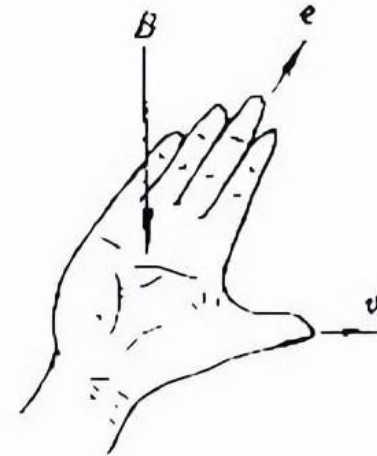
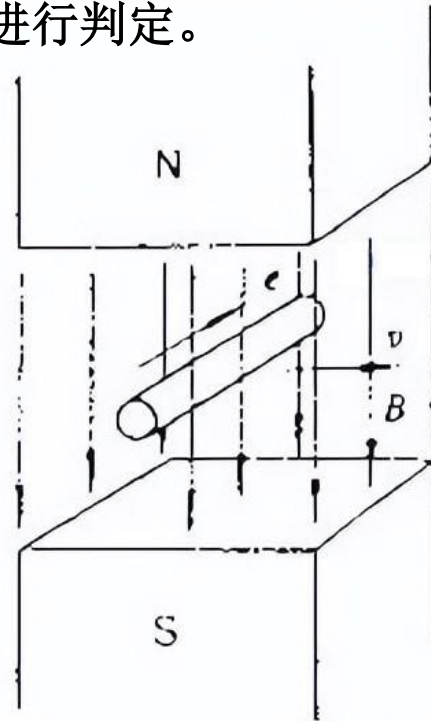
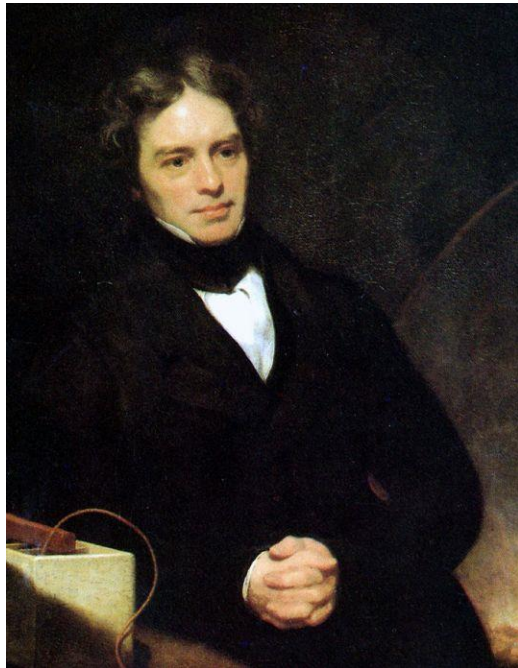


执行元件或执行器

电动机

Electric Motor

由于通电导体的运动会切割磁感线，此时就会产生感应电动势，那么感应电动势的方向就可以用右手定则进行判定。



$$E = vBl \sin \theta$$

电磁感应定律陈述一随时间改变的磁通量会创造电动势（磁场的改变产生电场）。

电学之父、交流电之父英国物理学家、化学家**法拉第**发明了第一台电动机，是第一台使用电流将物体运动的装置。

执行元件或执行器

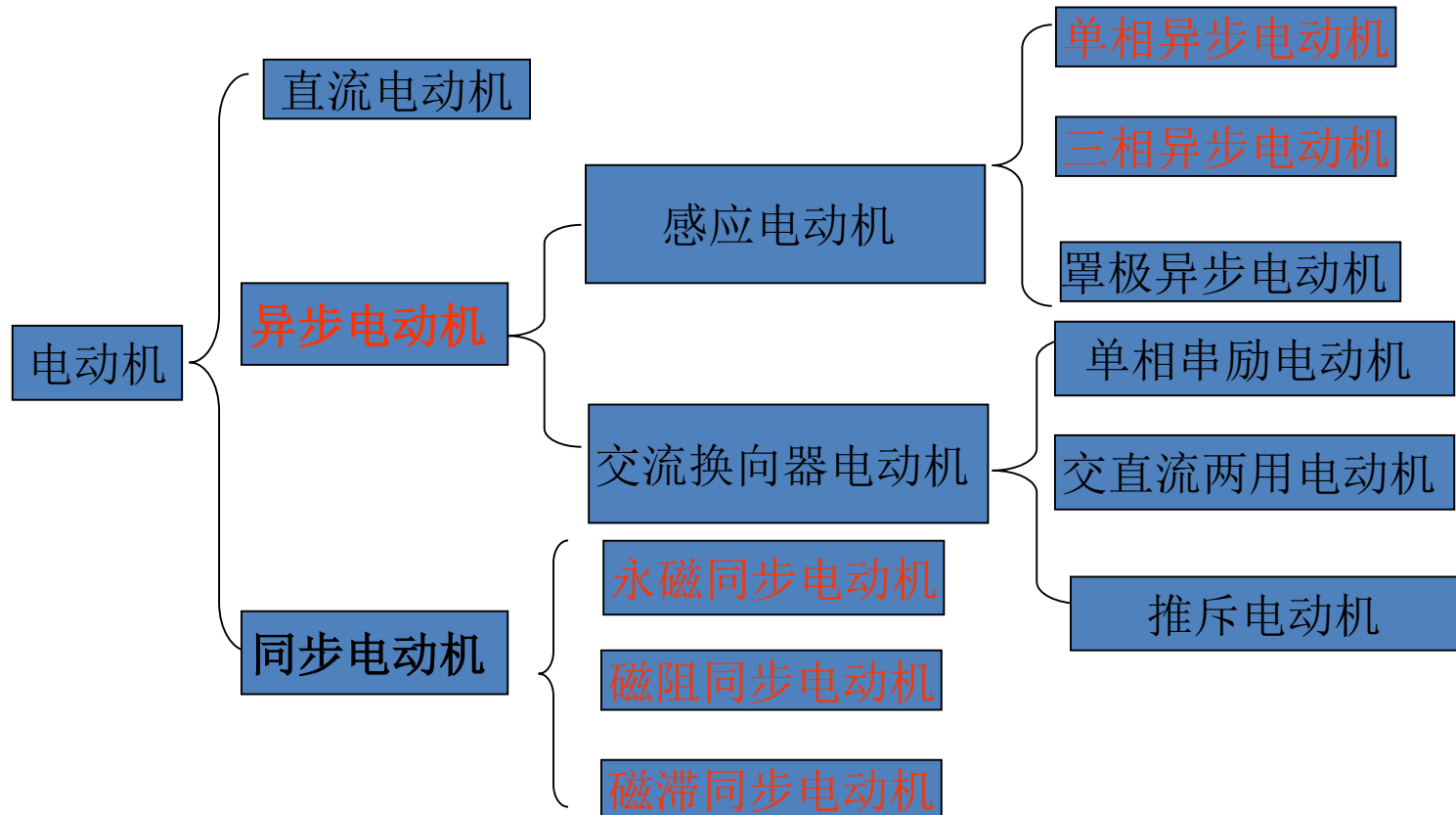


执行元件或执行器

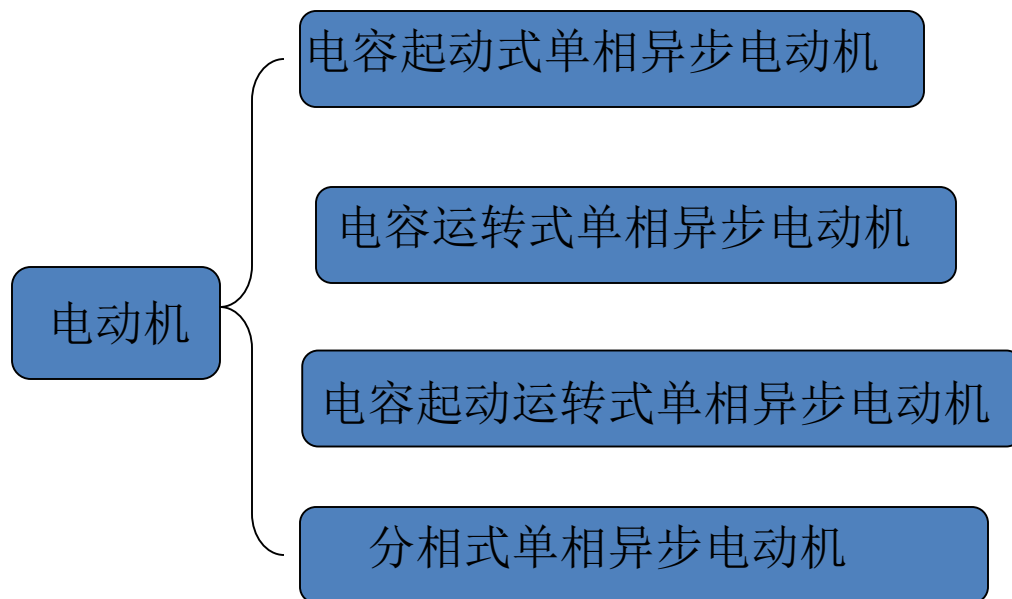
2、按结构和工作原理划分

同步电机机的转速与电磁转速同步，而异步电动机的转速则低于电磁转速。**滑差**

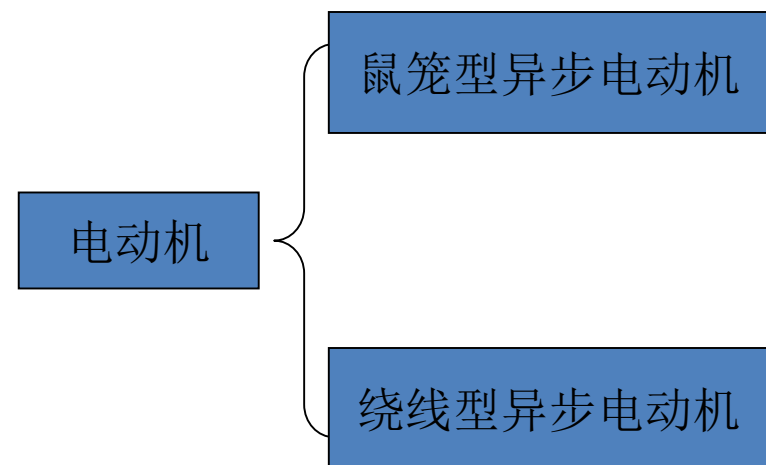
同步电动机主要用于大型发电机，而异步电动机几乎用于所有应用。



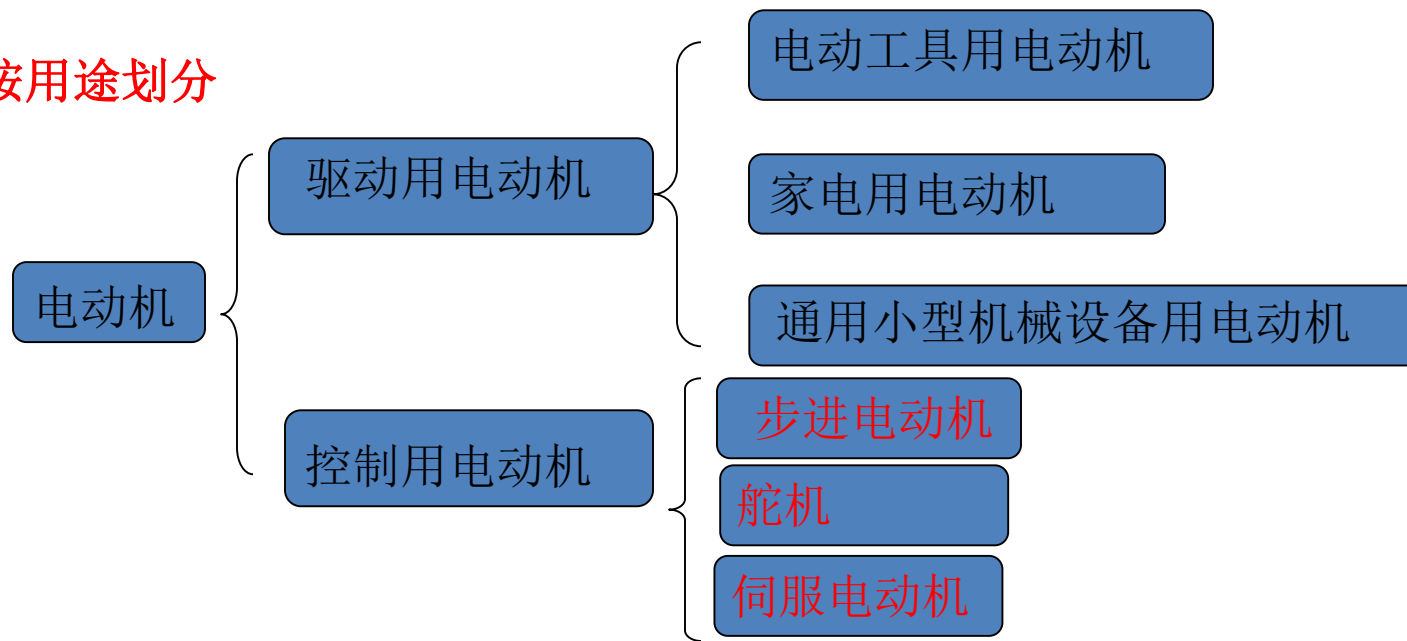
3. 启动与运行方式划分



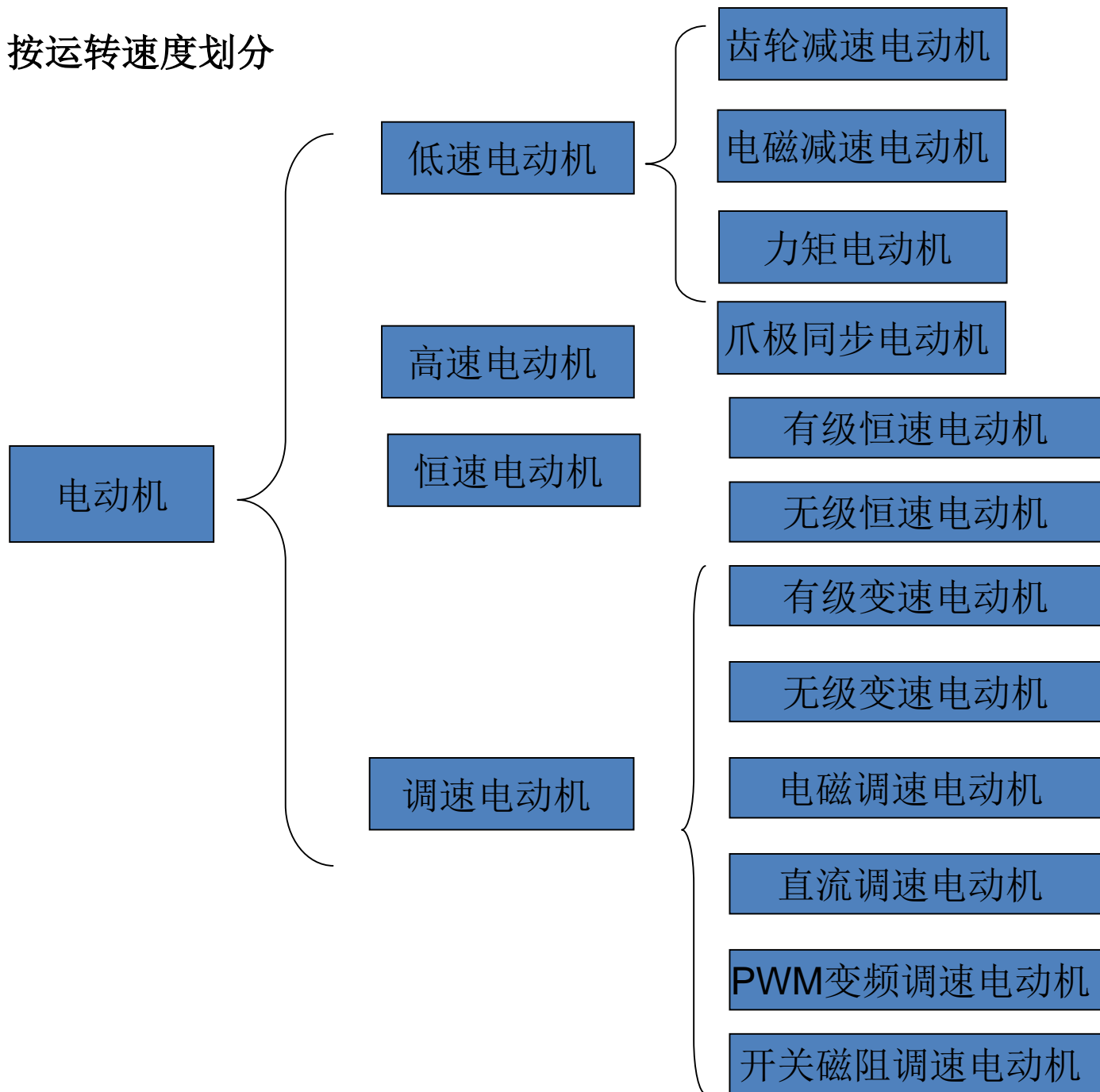
4. 按转子的结构划分



5. 按用途划分



6、按运转速度划分



执行元件或执行器

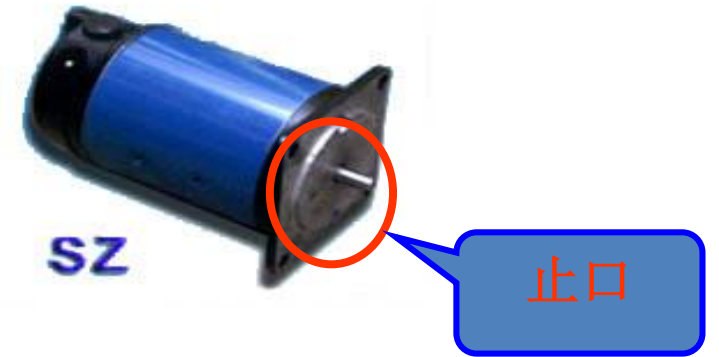
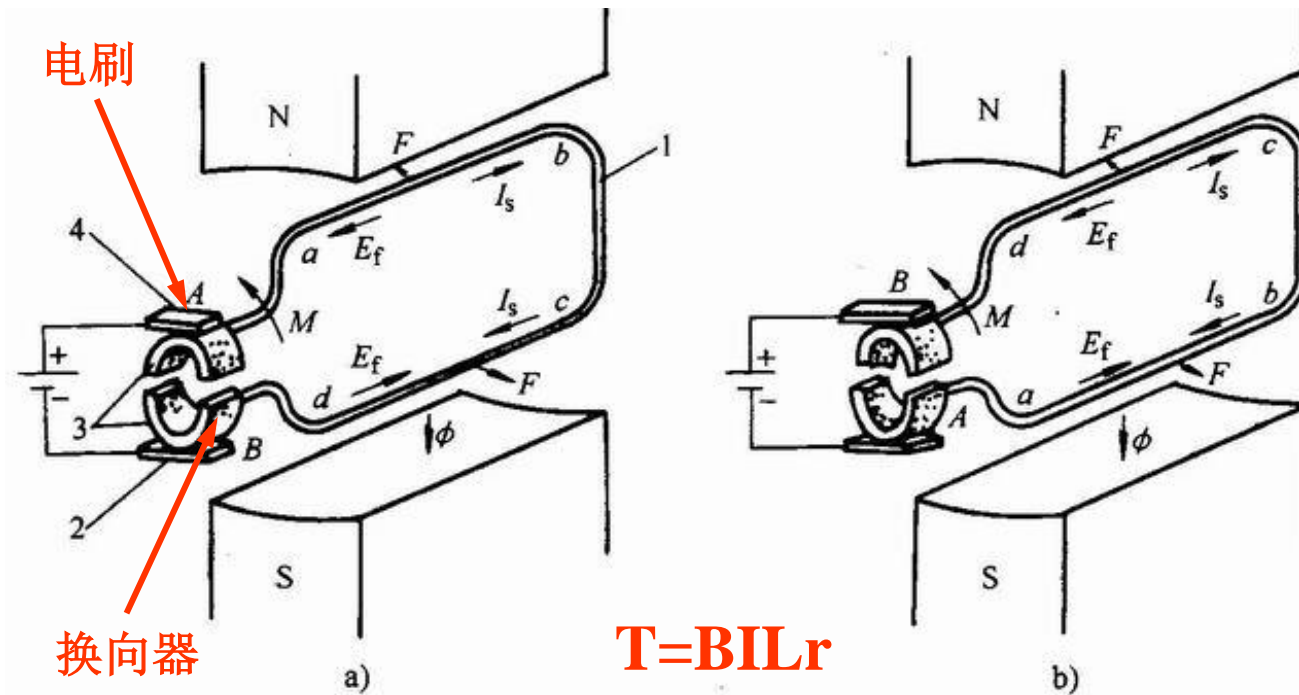
名称	特点
直流伺服电动机	可控性好、稳定性好、响应快、有电刷接触
交流伺服电动机	励磁电流小、体积较小、机械强度高、无电刷
反应式步进电动机	启动和运行频率高、断电时无定位转矩、消耗功率较大。
永磁式步进电动机	消耗功率较反应电机小、需正负脉冲供电、启动和运行频率较小、有定位转矩
混合式步进电动机	启动和运行频率较高、需正负脉冲供电、消耗功率较小、有定位转矩
直线步进电动机	提供直线运动、结构简单、惯量小
超声波电动机	低速大转矩、无电磁干扰、动作响应快、无输入自锁

执行元件或执行器

直流电机（DC motor）

直流有刷电机

左手定则



有刷直流电动机通过换向器将直流转换成电枢绕组中的交流，从而使电枢产生一个恒定方向的电磁转矩。

主要采用机械换向的方式，定子+转子+电刷，磁极不动，线圈转动，通过旋转磁场获得旋转力矩，进而输出动能。

执行元件或执行器



直流电机（DC motor）

直流无刷电机(BLDC) 在转子上安装有永磁体，通过电子元件实现电磁场的切换，从而驱动转子旋转。



外转子



定子

外转子电机

无刷直流电机采用电子换向驱动，由电机本体和驱动器组成，线圈不动，磁极旋转。利用电子电路迅速切换线圈中电流的方向，确保磁力方向正确，从而来驱动电机运转。



内转子电机

执行元件或执行器

直流电机（DC motor）

有刷与无刷直流电机的比较：

高速应用无刷电机具有优势；

使用寿命无刷电机具有优势；

无刷电机的适应性更强；

在需要快加速，高启动扭矩的应用，有刷电动机更适合；

简单驱动应用有刷电机布线和控制成本占优，精确控制两者相似。

无刷直流电机在电动工具、无人机等领域应用广泛，而有刷直流电机在家用电器、汽车起动机、机车等领域依旧占有一定的市场。

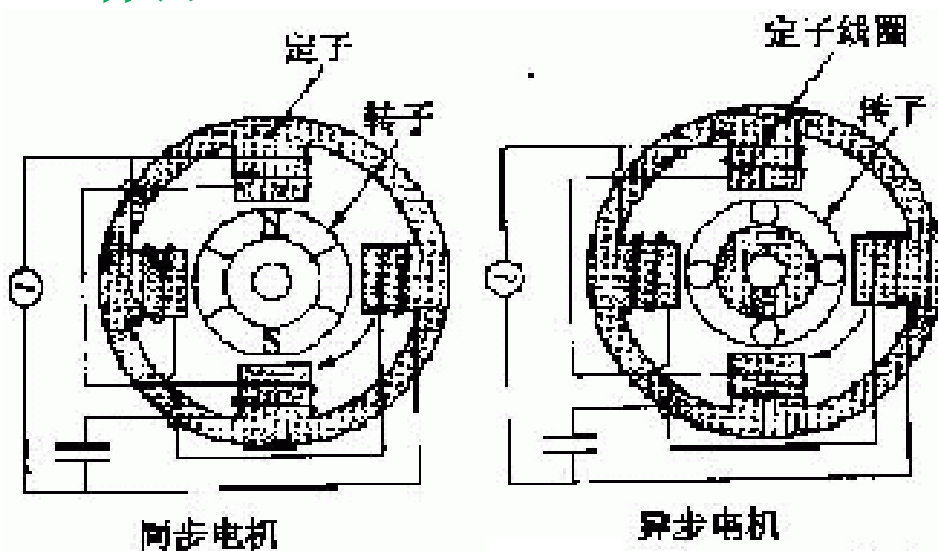
执行元件或执行器

交流电机（AC motor）

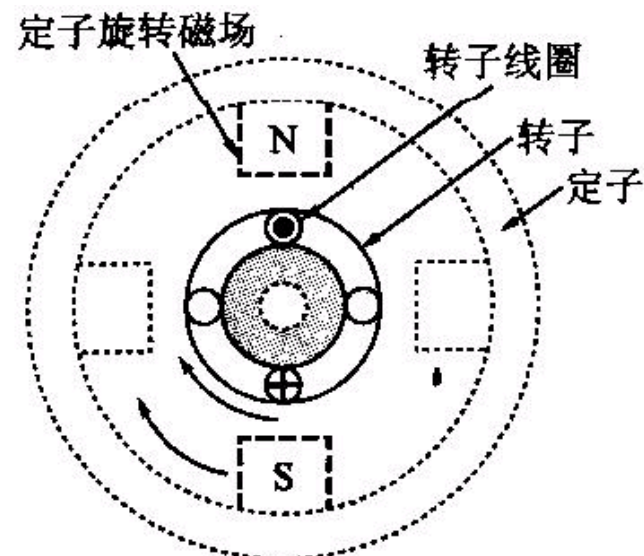
同步电机：转子是永磁体，所谓同步是指转子速度与定子磁场速度相同。

异步电机：转子和定子上都有绕组，所谓异步是指转子磁场和定子间存在速度差（不是角度差）。

工作原理



AC电机的构造



异步交流电机的工作原理

执行元件或执行器

交流电机的特点：无电刷和换向器，无产生火花的危险；比直流电机的驱动电路复杂、价格高。

同步电机的特点：体积小。用途：要求响应速度快的中等速度以下的工业机器人；机床领域。

异步电机的特点：转子惯量很小，响应速度很快。用途：中等功率以上的伺服系统。

交流电机的控制方式

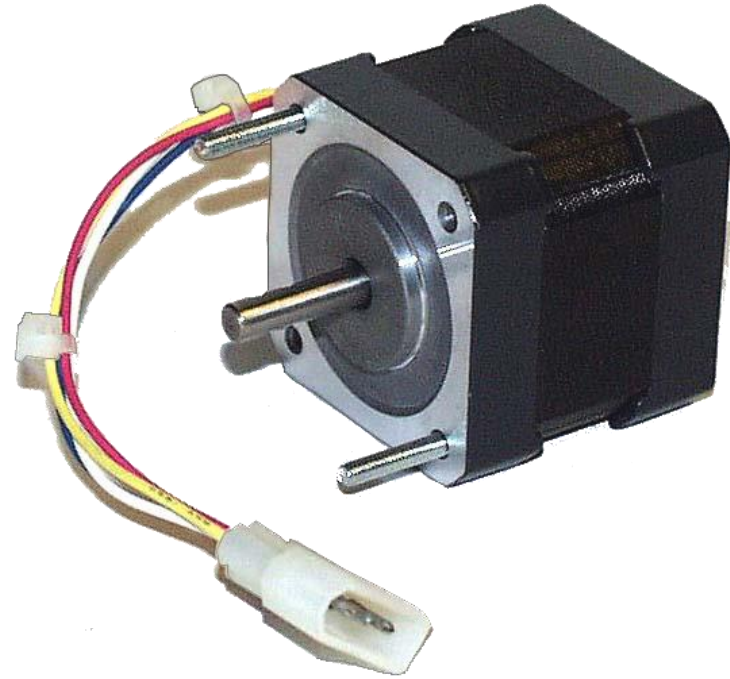
改变定子绕组上的电压或频率，即**电压控制或频率控制方式**。



执行元件或执行器

控制电动机

- 步进电动机：开环控制
- 舵机：闭环控制
- 伺服电动机：闭环控制



执行元件或执行器

步进电动机（Stepper Motor）

步进电机驱动系统主要用于开环位置控制系统。

优点：控制较容易，维修也较方便，而且控制为全数字化。

缺点：由于开环控制，所以精度不高。



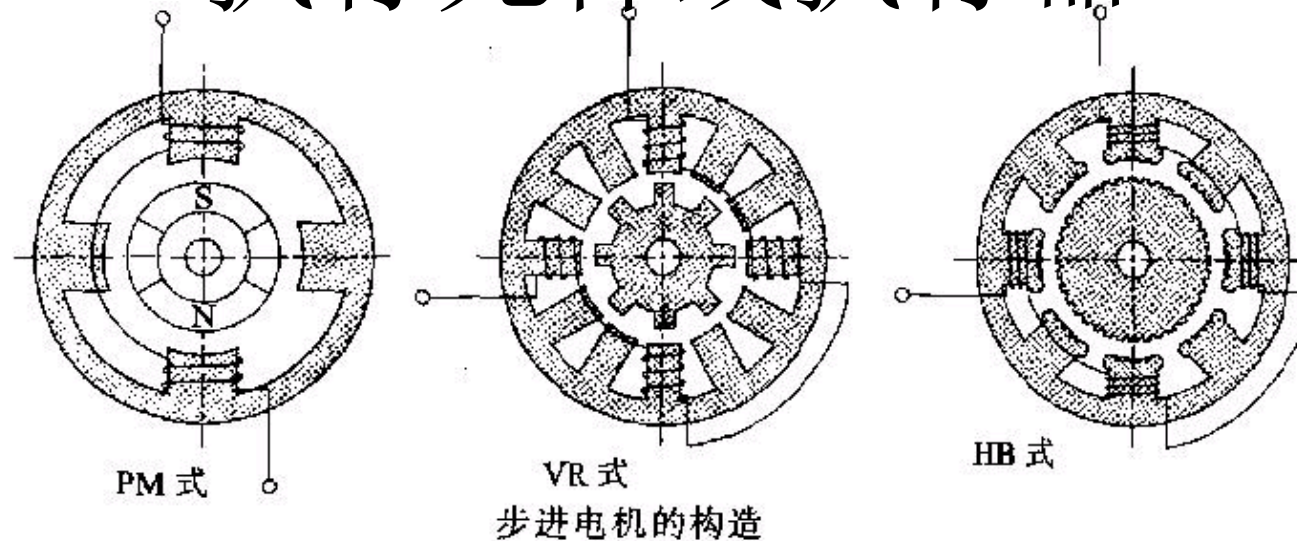
执行元件或执行器

工作原理

步进电机是一种将电脉冲转化为角位移的执行机构。简单说：当步进驱动器接收到一个脉冲信号，它就驱动步进电机按设定的方向转动一个固定的角度（及步进角）。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。

步进电机有三种：永磁式PM（permanent magnet）；反应式（也称可变**磁阻式**）VR（variable reluctance），在欧美等发达国家80年代已被淘汰；混合式HB（hybrid），混合式是指混合了永磁式和反应式的优点，**混合式步进电机的应用最为广泛。**

执行元件或执行器



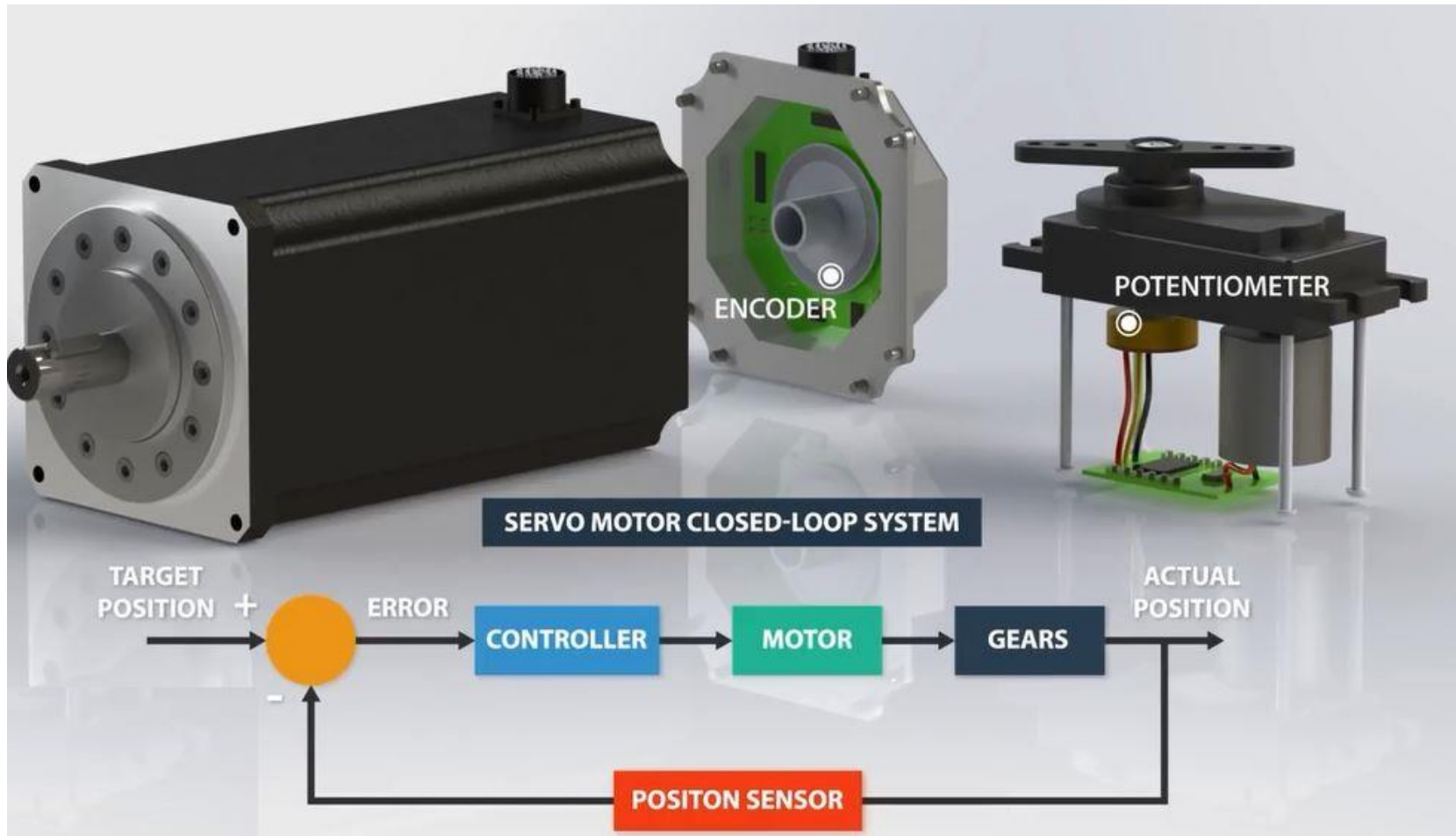
PM式步进电机转子是永磁体，定子是绕组，在定子电磁铁和转子永磁体之间的排斥力和吸引力的作用下转动，步距角一般为 $7.5^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 。

VR式步进电机用齿轮状的铁心作转子，定子是电磁铁。在定子磁场中，转子始终转向磁阻最小的位置。步距角一般为 $0.9^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。

HB式步进电机是PM式和VR式的复合形式。在永磁体转子和电磁铁定子的表面上加工出许多轴向齿槽，产生转矩的原理与PM式相同，转子和定子的形状与VR式相似，步距角一般为 $0.9^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 。

执行元件或执行器

伺服电机
舵机



闭环控制

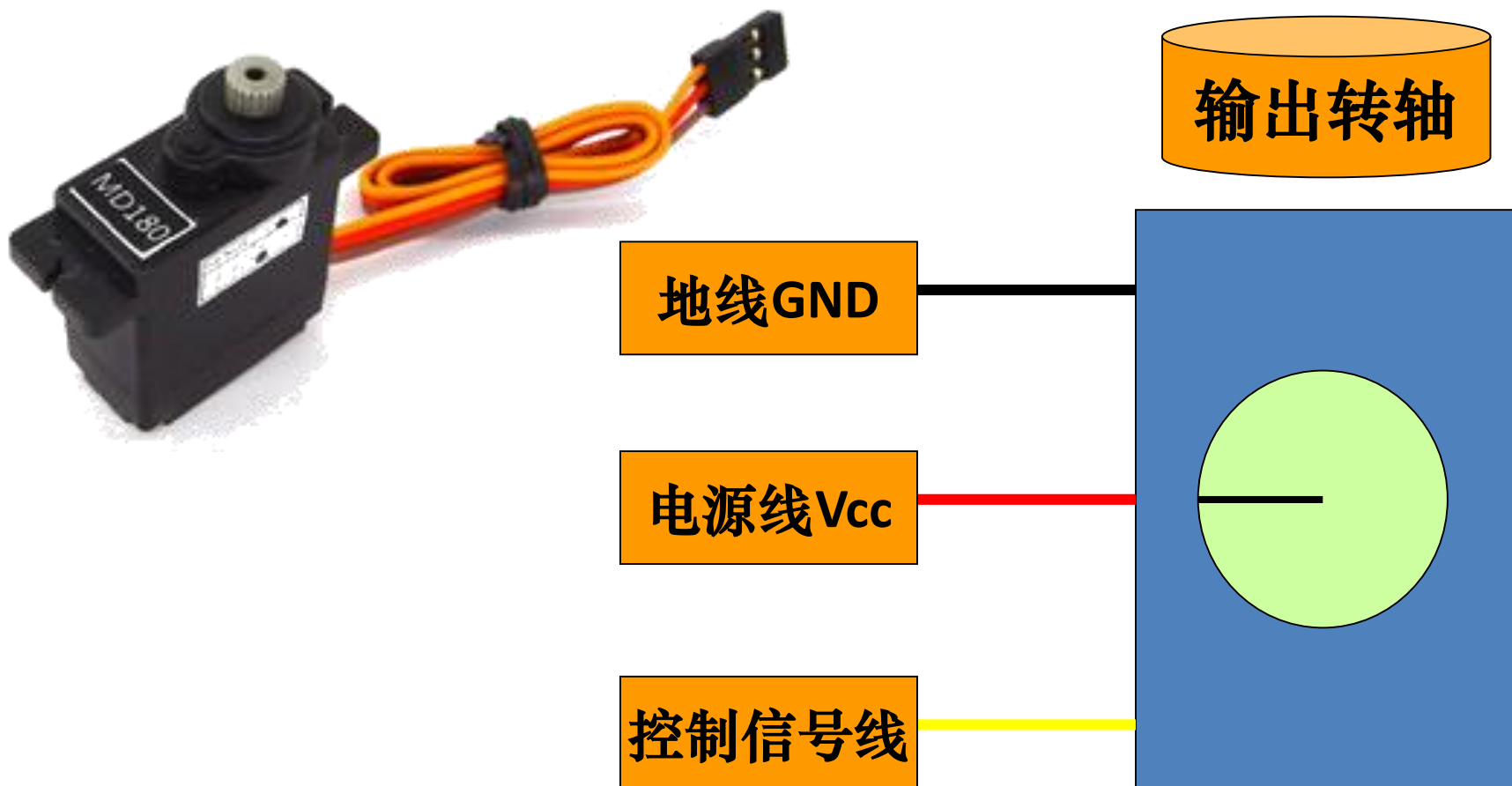
执行元件或执行器

- **舵机:** 位置（角度）伺服驱动装置
 - 适用于需要角度连续变化并且能够保持的控制系统(机器人关节、航模方向)



执行元件或执行器

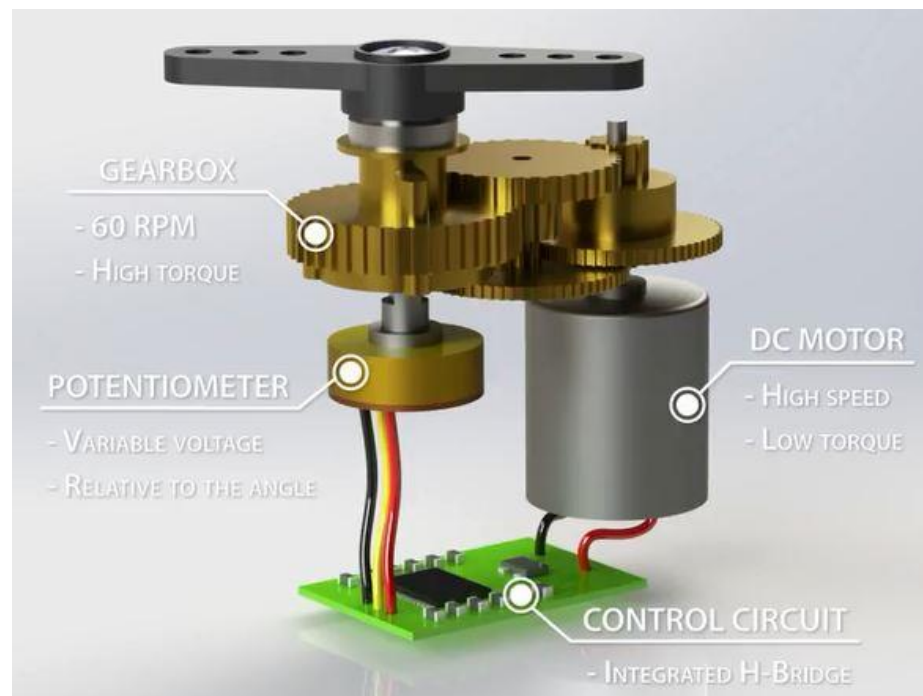
舵机的外部连接



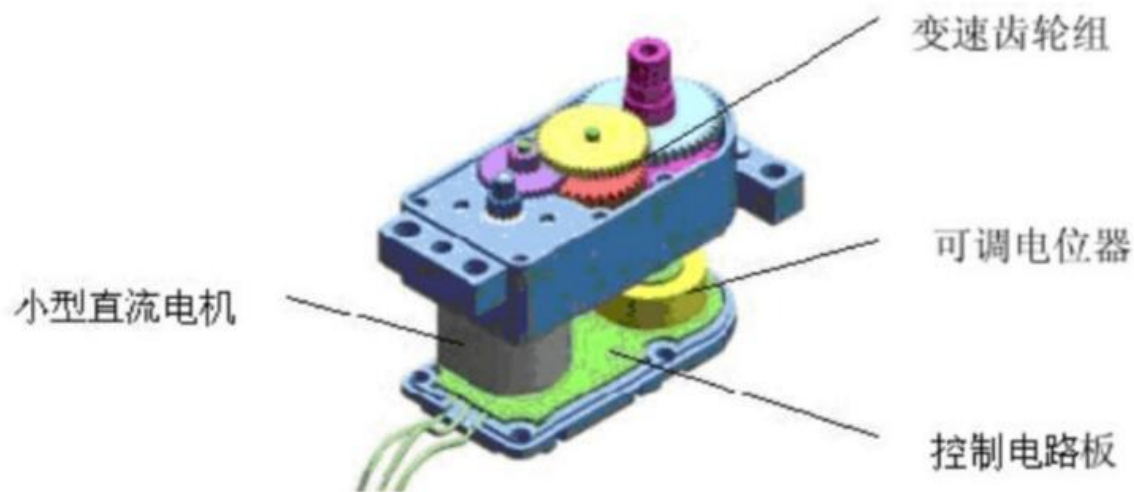
舵机的构成

- 直流电机
- 减速齿轮组
- 舵盘
- 位置反馈电位器
- 控制电路

执行元件或执行器



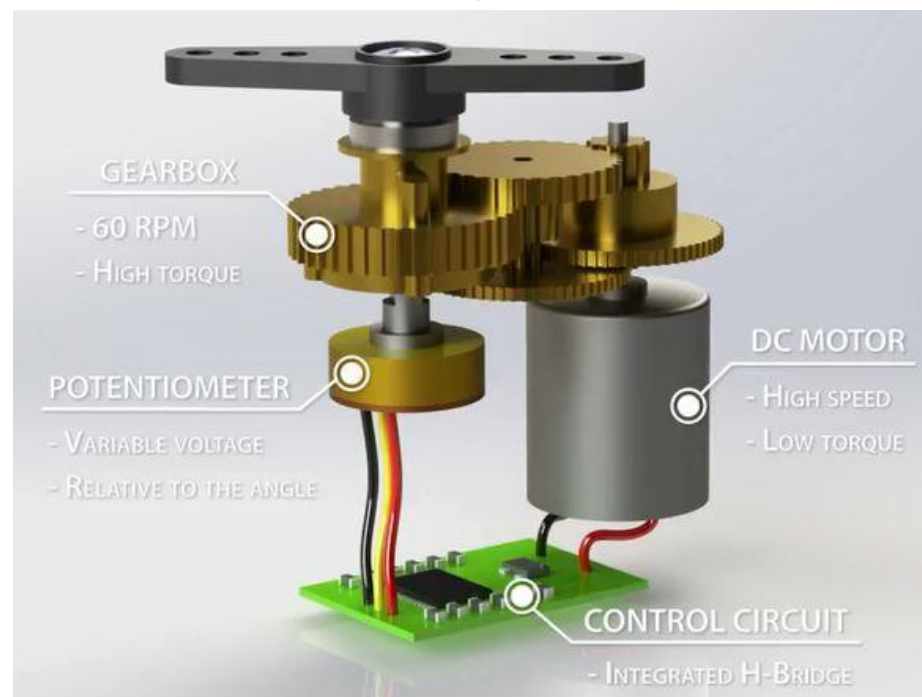
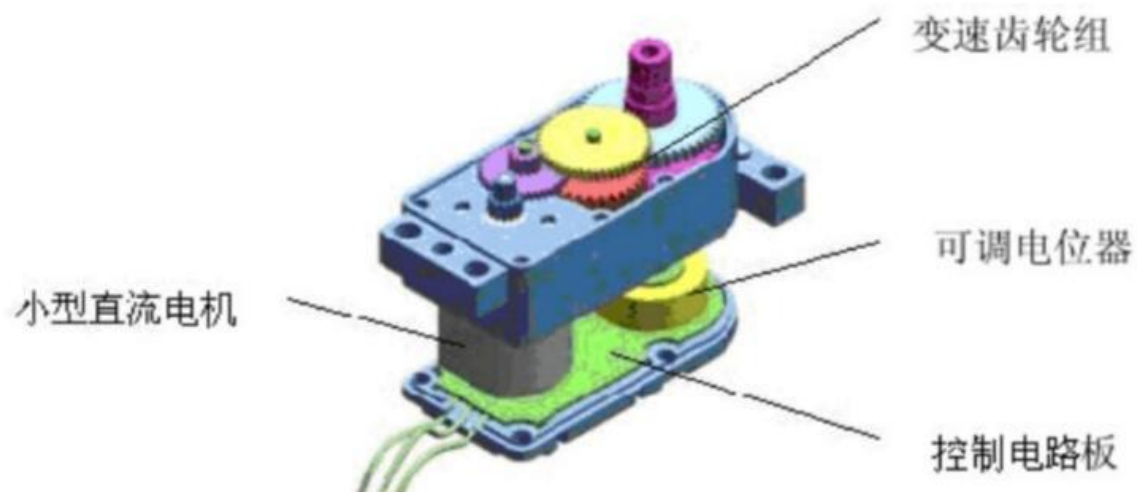
塑料齿轮的舵机在超出极限负荷的条件下使用可能会崩齿，金属齿轮的舵机则可能会电机过热损毁或外壳变形。



执行元件或执行器

舵机工作原理

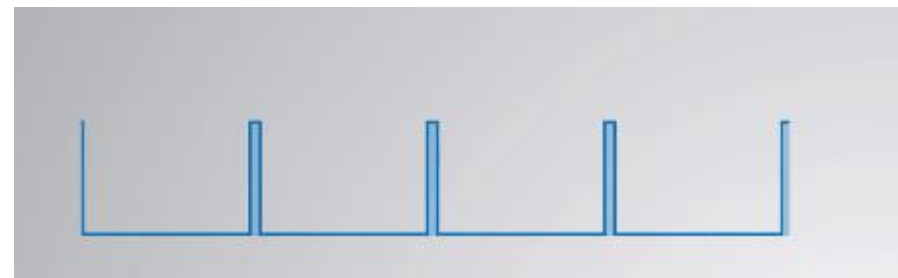
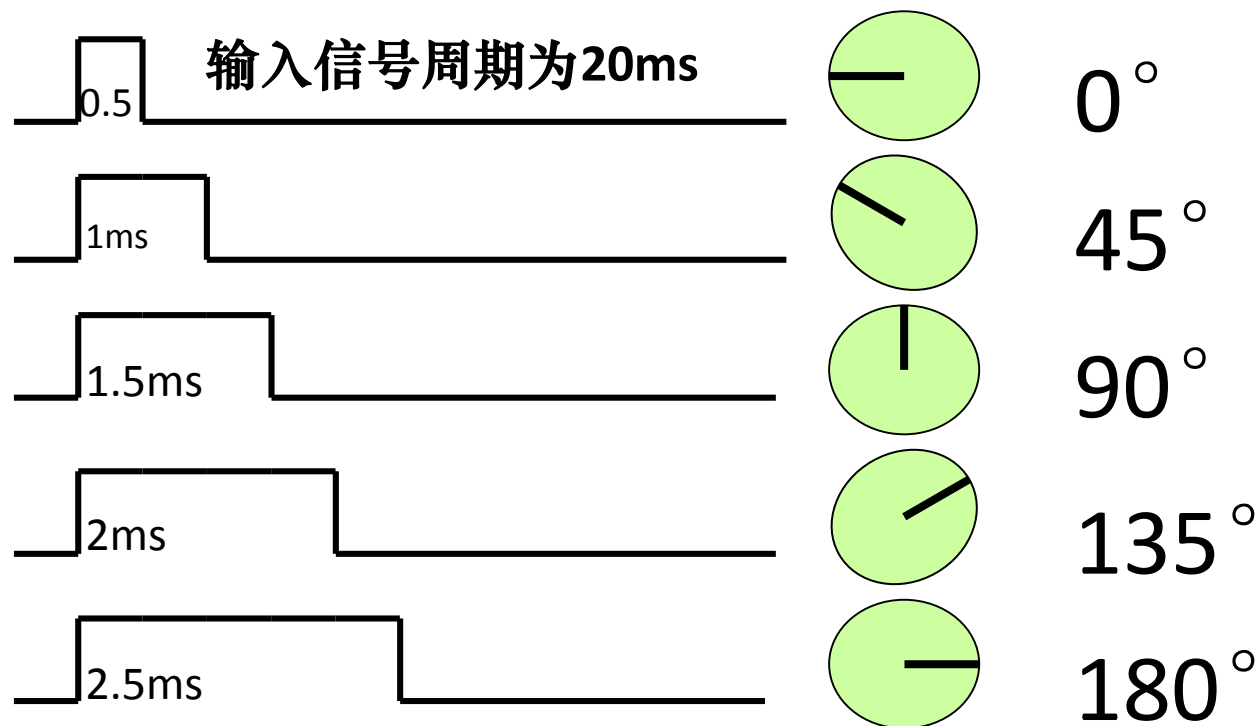
- 控制电路接收控制信号，控制电机转动，带动减速齿轮组，传动至输出舵盘；舵机输出轴与位置反馈电位器相连，舵盘转动时带动位置反馈电位器，产生一个电压信号反馈到控制电路；控制电路根据所在位置决定电机的转动方向和速度，达到目标时停止运动。



执行元件或执行器

舵机旋转角度的控制

- 舵机输出轴转角范围 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$
- 舵机控制电路的信号周期为20ms
- 控制信号的脉冲宽度（0.5ms~2.5ms）与转角成正比



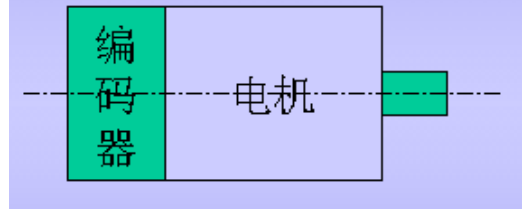
执行元件或执行器

伺服电机， Servo

- 分为交流伺服电动机和直流伺服电动机。伺服电动机的作用是驱动控制对象。被控对象的转矩和转速受信号电压控制，信号电压的大小和极性改变时，电动机的转动速度和方向也跟着变化。
- 交流伺服电机的输出功率一般为0.1-100 W，电源频率分50Hz、400Hz等多种。
- 直流伺服电机的结构与工作原理与直流电动机相同，只是为了减小转动惯量，电机比较细长。
- 直流伺服电机的特性较交流伺服电机硬。经常用在功率稍大的系统中，它的输出功率一般为1-600W。



AC servomotor



执行元件或执行器

伺服电机的优势

- 1、实现了位置，速度和力矩的闭环控制；克服了步进电机失步的问题；
- 2、高速性能好，一般额定转速能达到2000~3000转；
- 3、抗过载能力强，能承受三倍于额定转矩的负载，对有瞬间负载波动和要求快速起动的场合特别适用；
- 4、低速运行平稳，低速运行时不会产生类似于步进电机的步进运行现象。适用于有高速响应要求的场合；
- 5、电机加减速的动态响应时间短，一般在几十毫秒之内；
- 6、发热和噪音明显降低。

执行元件或执行器

电动机的选择（转矩—转速曲线）

电动机将会起动并加速至足够速度吗？起动转矩

电动机可以产生的最大转速是多少？最大空载速度

负载需要多少功率？额定功率

电动机的可用电源？交流还是直流？

负载惯性是什么？

负载能在恒速驱动吗？交流同步电动机或直流并励电动机，步进电动机和伺服电动机可以达到恒速驱动，不适用于较大尺寸。

需要准确的位置或速度控制吗？步进电机是一种不错的选择。伺服电机是最好的选择。

需要一个传动装置或变速箱吗？

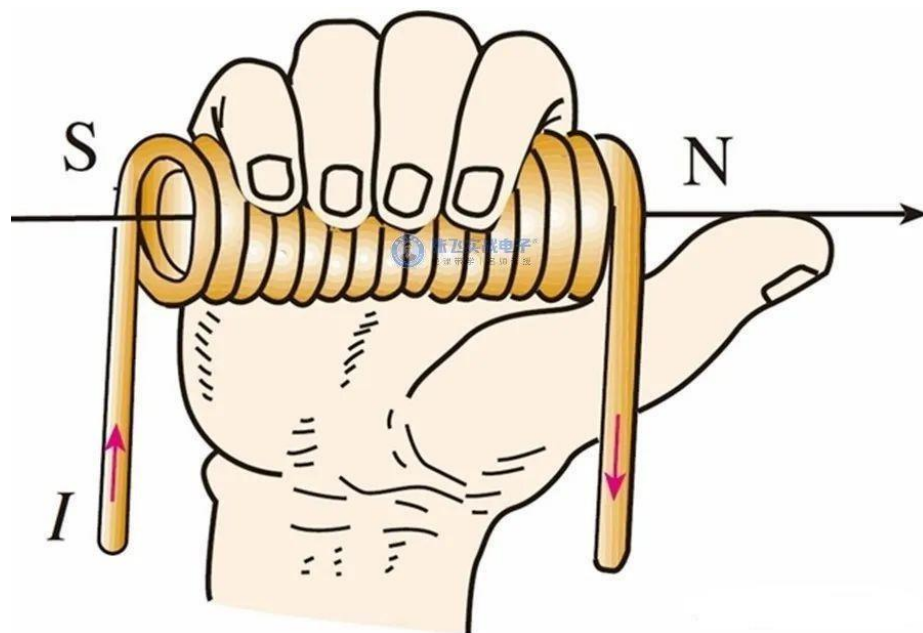
电动机的转矩—转速曲线能很好地与负载匹配吗？

有必要反转电动机吗？

电动机有尺寸和重要限制吗？

执行元件或执行器

通电螺线管的极性跟电流方向间的关系，可以用**右手螺旋定则（安培定则）**来判断。就是用右手握住螺线管，让四根手指弯曲且跟螺线管中电流的方向一致，则**大拇指**所指的那端就是螺线管的N极。注意：右手螺旋定则中所说的“电流的方向”是指螺线管中“电流的环绕方向”，右手四根手指的弯曲方向应跟电流的环绕方向一致。

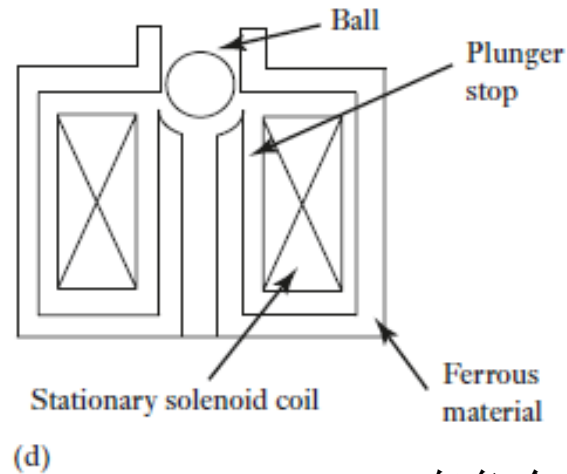
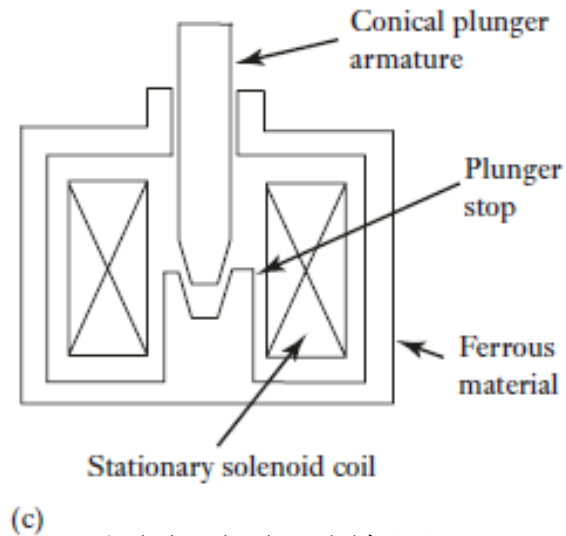
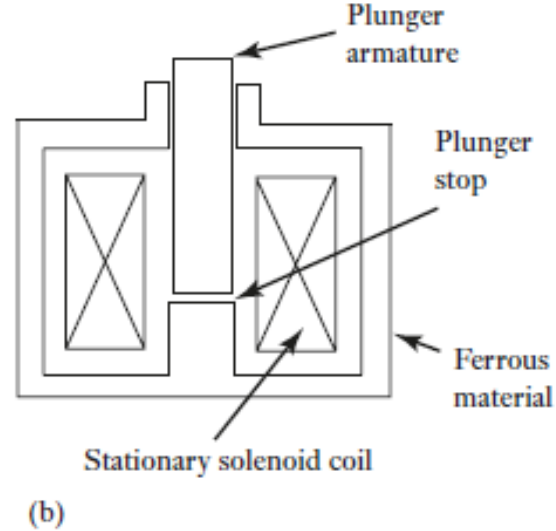
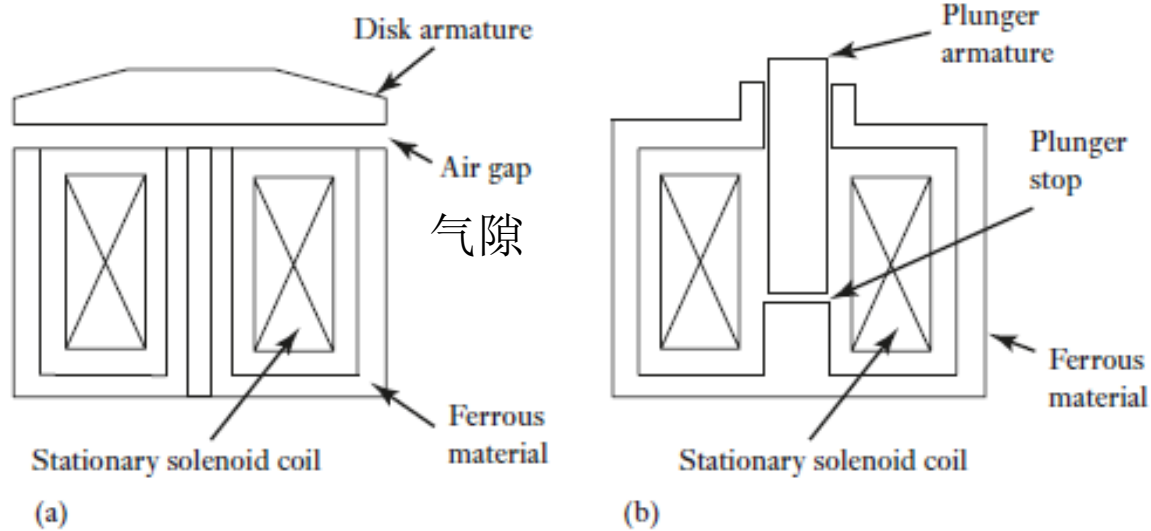


执行元件或执行器

- **螺线管**是由线圈和衔铁组成的。当有电流通过线圈时，产生磁场，吸引衔铁。衔铁的运动使复位弹簧收缩，当电流停止时复位弹簧使衔铁回到初始位置。
- 螺线管可以是直线的或旋转的，可以是开关型或位置可变型的，可在直流或交流下操作。它可用做电动操作控制的驱动器，广泛应用于短冲程器件中，典型的冲程可达25mm。



执行元件或执行器



(a) **Disk armature** 盘形衔铁，短冲程和快速运动

(b) **plunger armature** 柱塞衔铁，短冲程和快速运动

(c) **Conical plunger armature** 锥形柱塞衔铁，长冲程，自动锁门机构

(d) 球形衔铁，流体控制，气囊展开机构。

螺线管

固定式电磁线圈

有色金属材料

执行元件或执行器



直流圆管推动型电磁螺线管



型号:LY01
24V/1.2A【常规款】
通电缩回/断电弹出



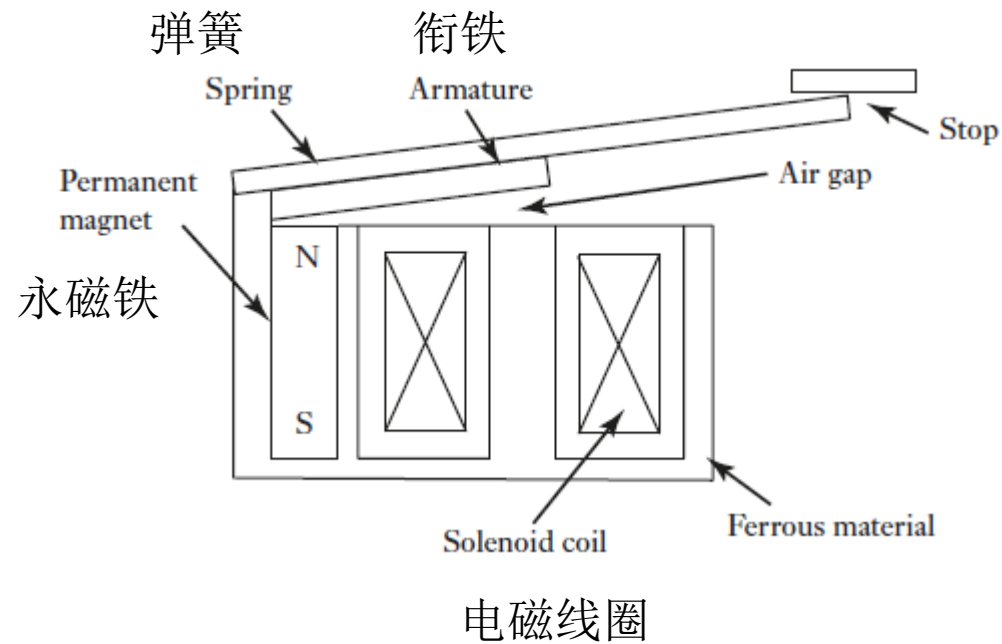
断电状态



通电状态

执行元件或执行器

- 螺线管驱动器也可被锁定，即当螺线管中的电流断开时仍保持它们的驱动位置。



执行元件或执行器

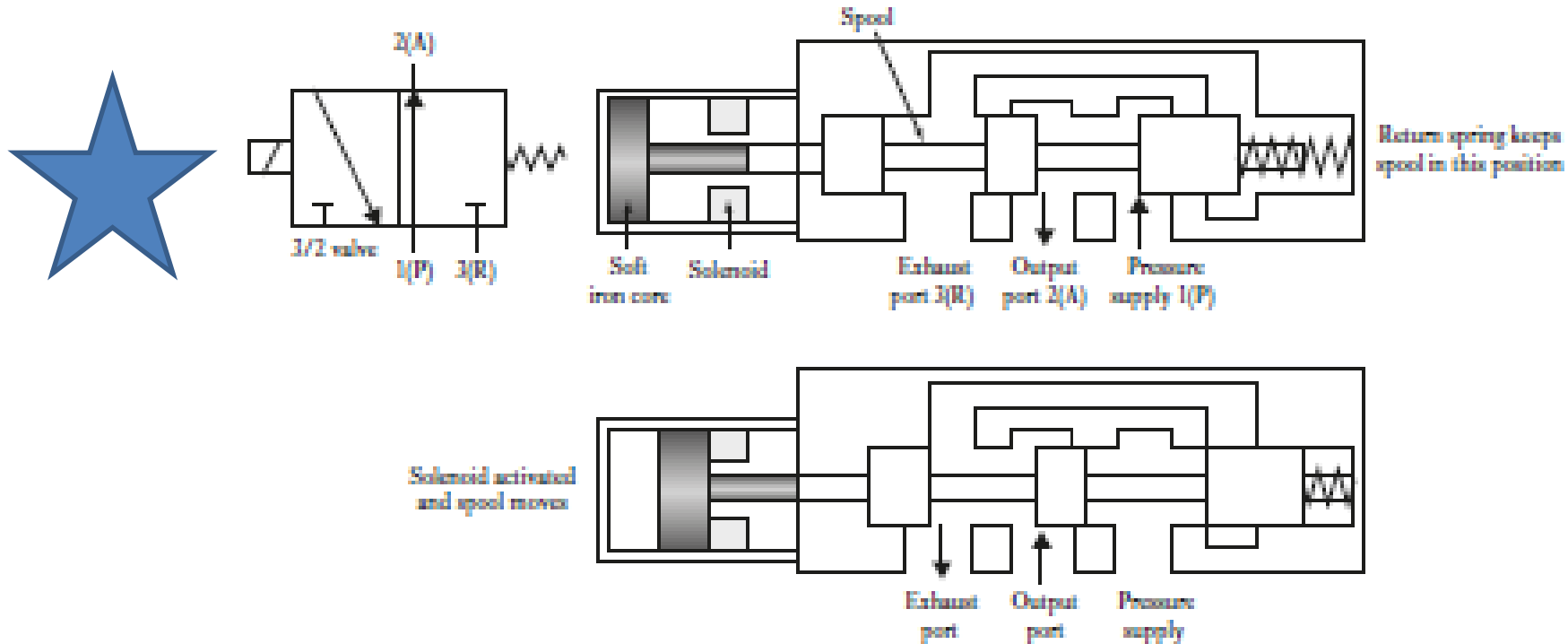
液压与气动电磁阀：螺线管（电磁线圈）

- 开关控制电磁阀
- 比例控制电磁阀：比例压力阀、比例流量阀和比例方向阀
- 伺服阀：液压伺服阀是一种通过改变输入信号，连续、成比例地控制流量和压力进行控制的。根据输入信号的方式不同分为：电液伺服阀和机液伺服阀。

执行元件或执行器

- 螺线管（电磁线圈）施加在衔铁上的力是线圈中的电流和线圈内衔铁的长度
的函数。
- 开关控制电磁阀（电液阀）

滑阀

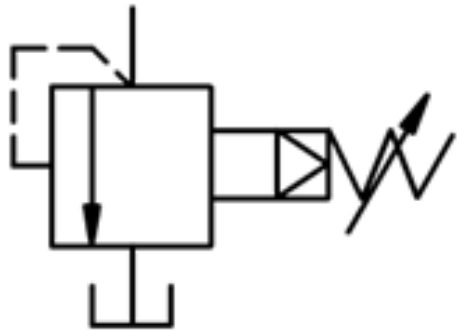


执行元件或执行器

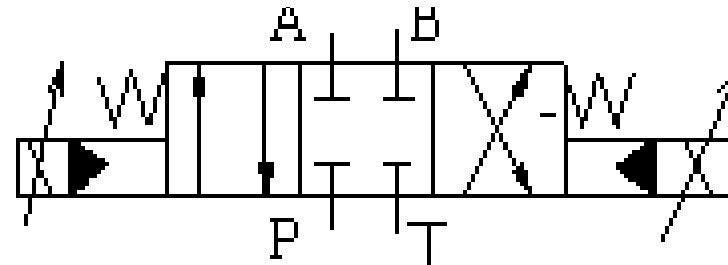
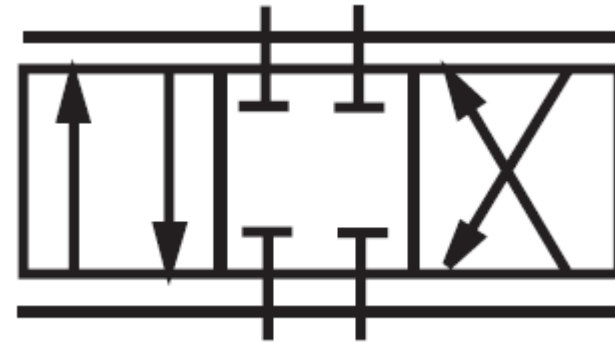
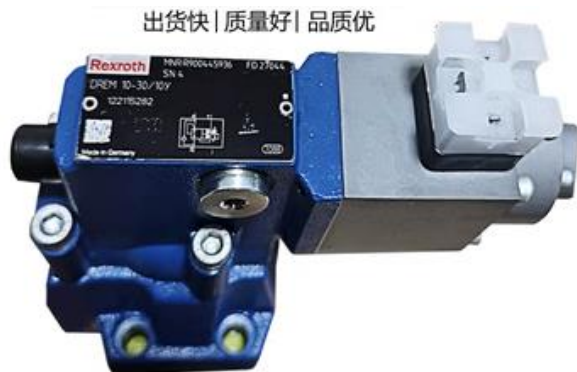


电液比例控制阀

- 在比例控制阀中，通过控制线圈中的电流使活塞的位移与电流的大小成比例。



电磁比例压力阀



电液比例换向阀



执行元件或执行器

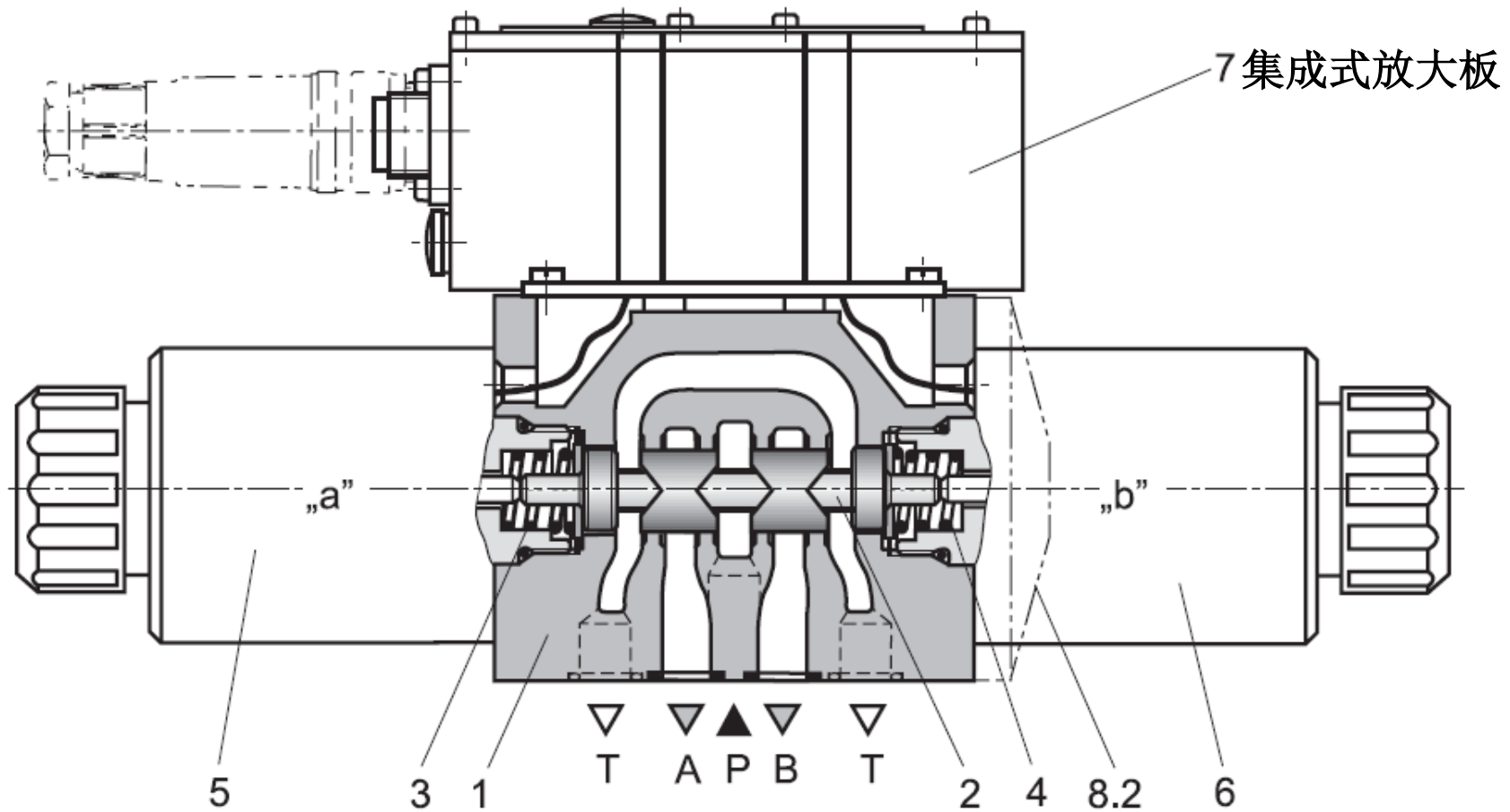
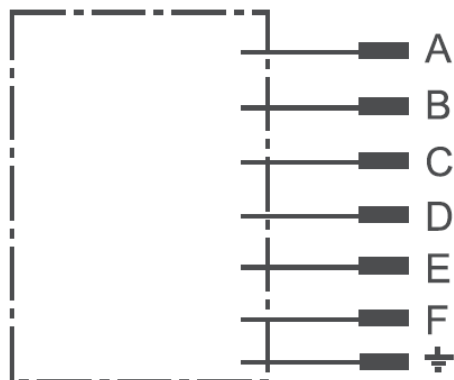


图.

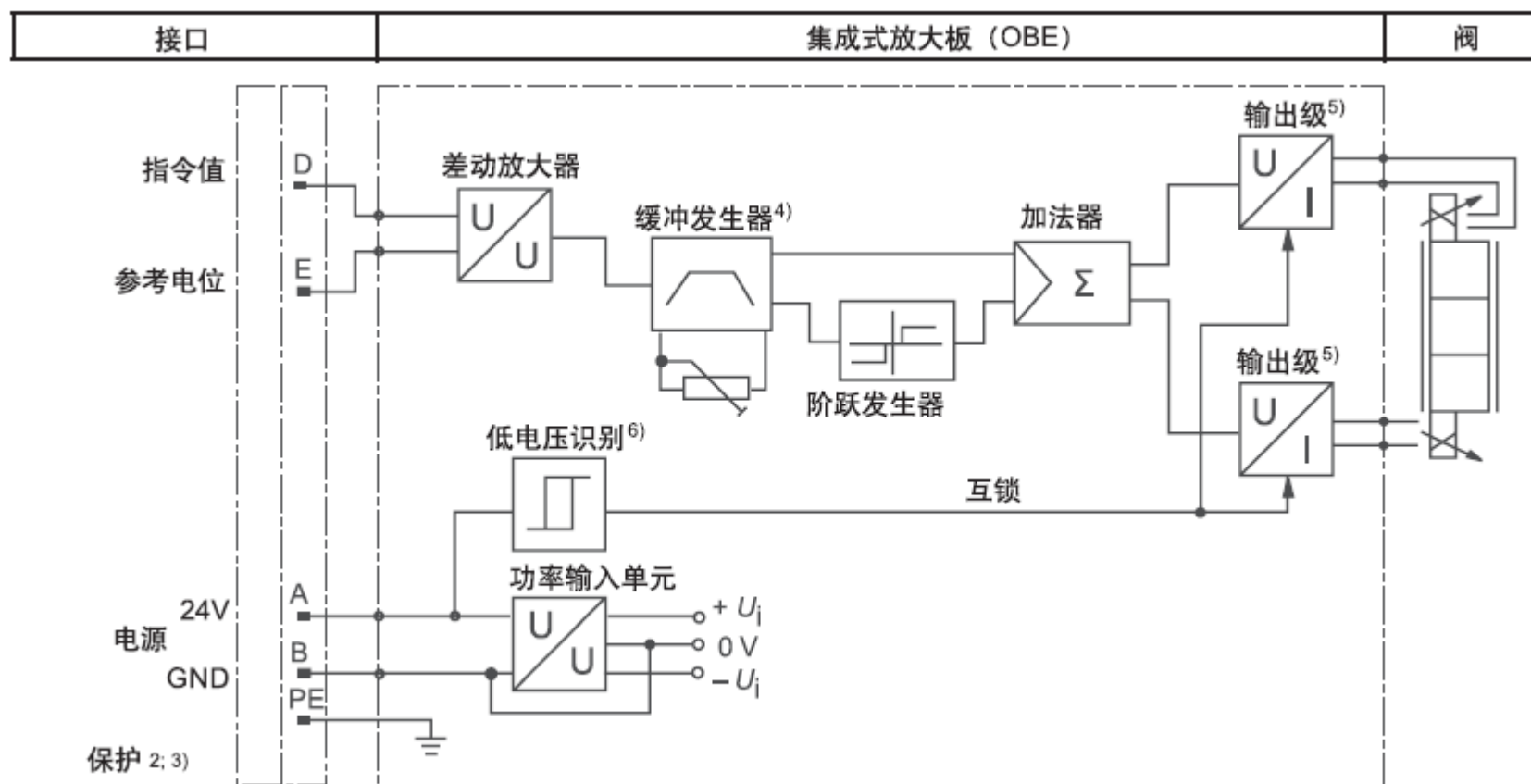
三位四通比例方向阀

阀芯的位移与输入电信号成比例
阀芯不带位移电反馈



端子标识	接点	信号
电源电压	A	24 VDC (19 到 35 VDC)
	B	GND
	C	n.c. ¹⁾
差动输入	D	指令值 ($\pm 10 \text{ V} / 4\text{-}20 \text{ mA}$)
	E	基准电位
	F	n.c.

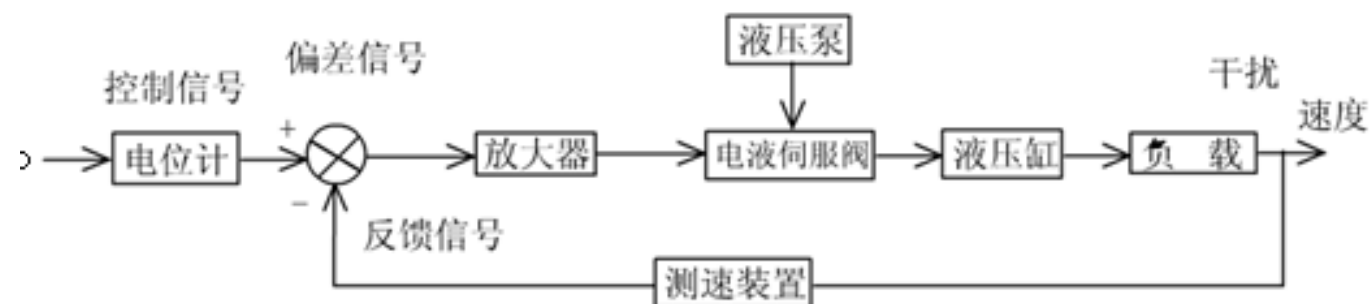
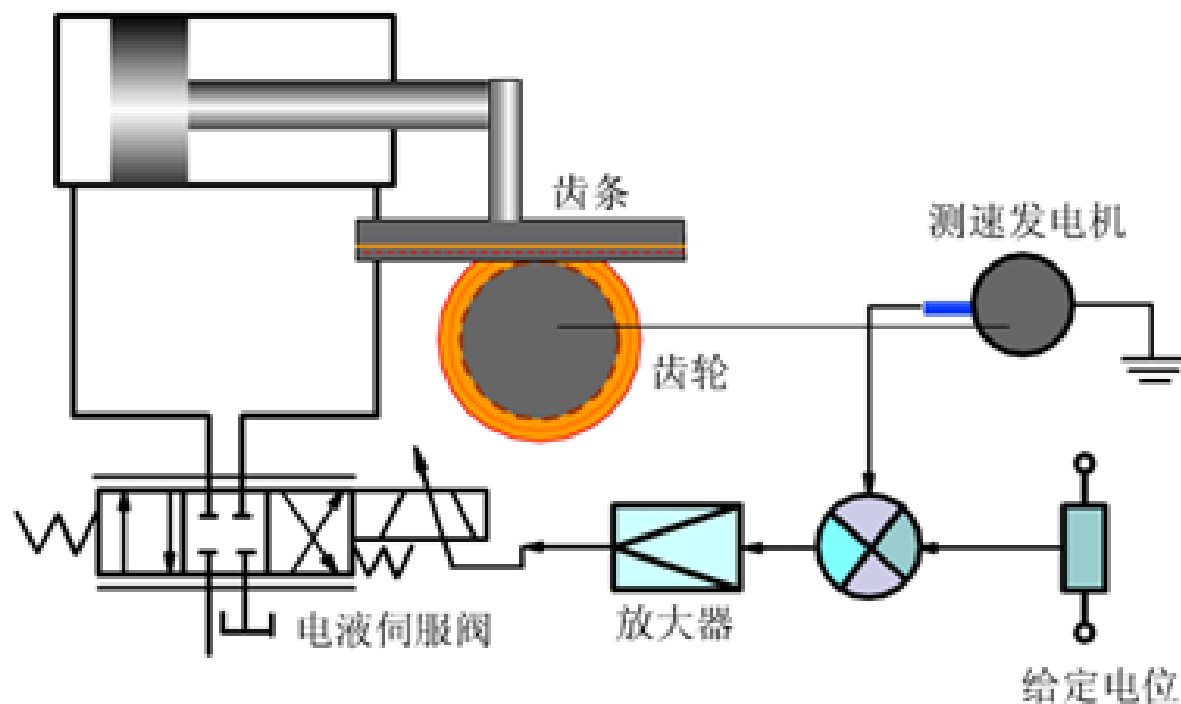
集成式放大板



加在D、E上正的指令值 (0至10V或12-20mA) 会使阀上P口到A口及B口到T口接通。
 加在D、E上负的指令值 (0至-10V或12 - 4mA) 会使阀上P口到B口及A口到T口接通。

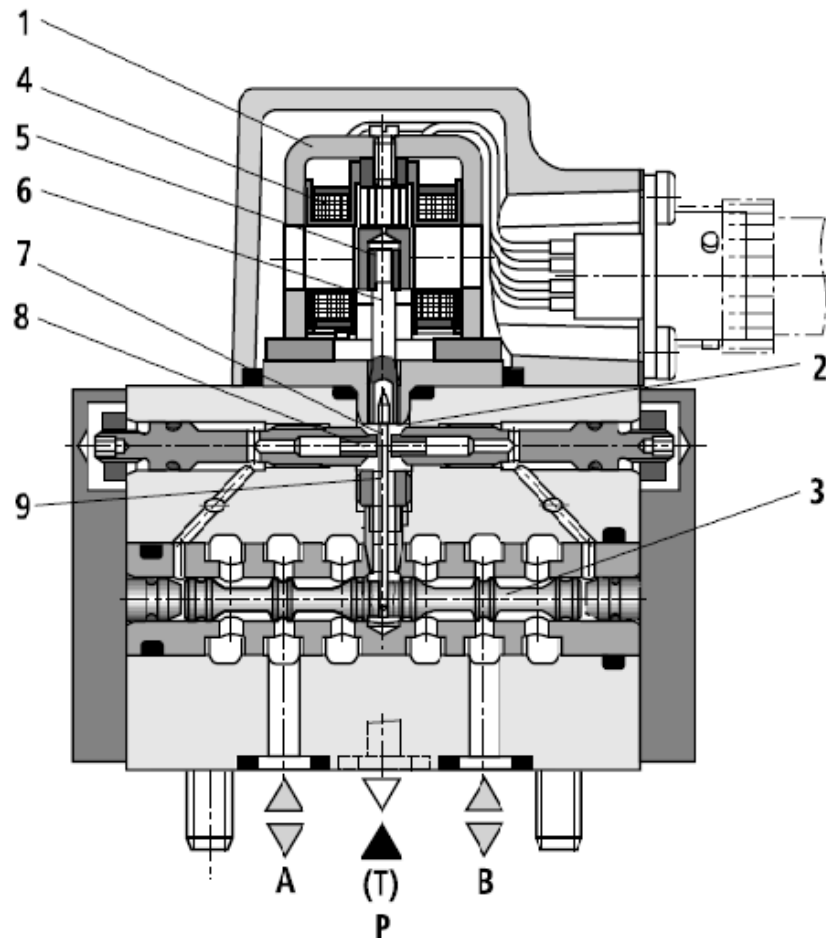
执行元件或执行器

电液伺服阀



执行元件或执行器

- 4WS (E) 2EM6-2X/... 型四通伺服方向阀主要用于力、位置和速度闭环控制。



这类阀由一个电机转换器（力矩马达）（1），一个液压放大器（喷嘴挡板原理）（2），一个阀套（第2级）内的控制阀芯（3），阀芯通过一机械反馈连接到力矩马达上。

在力矩马达的线圈（4）输入一电信号，通过电枢（5）上的永久磁铁产生一个力，这个力作用到扭矩管（6）上产生一个力矩。由于挡板（7），通过一连杆连接到扭矩管的喷嘴挡板离开控制喷嘴（8）的中心位置，这样就导致一个压力差，作用在控制阀芯（3）的前工作面。压力差使得阀芯移动，由此压力腔连到一执行器上，同时另一个执行器与回油腔连接。

控制阀芯通过一反馈弹簧（机械反馈）（9）连到喷嘴挡板和力矩马达上。控制阀芯不断改变位置，直到反馈弹簧的反馈扭矩和力矩马达的电磁扭矩达到平衡，喷嘴挡板系统的压差变为零。

阀芯的行程和通过先导控制阀的流量实现了闭环控制，与输入电信号成正比。不管如何考虑，流量由压力差决定。

电子放大器（10）用于模拟输入信号的放大，与阀相配套。它内置于力矩马达的盖板内的插头（11）。

执行器的驱动

- 开关（启闭）控制：机械开关（继电器）、固态开关（二极管、晶体管和晶闸管）、固态继电器
- 常用功率器件：半导体功率开关元件（晶闸管）和线性功率元件（功率晶体管、功率场效应晶体管和功率模块）。
- 电动机的驱动（步进、直流和交流）

常用功率器件

- 二极管
- 晶闸管和三端双向可控硅
- 双极性晶体管
- 功率金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET)

电子技术

微电子技术：弱电领域

电力电子技术：强电领域

电力电子器件

晶闸管 (SCR)

可关断晶闸管 (GTO)

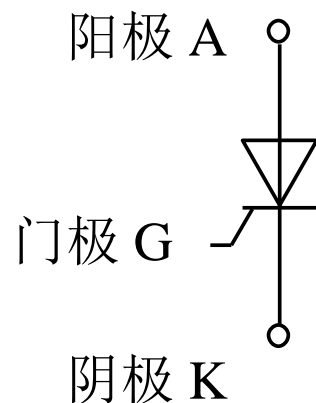
功率晶体管 (GTR)

功率场控晶体管 (MOS-FET)

绝缘门极双极晶体管 (IGBT)

常用功率器件

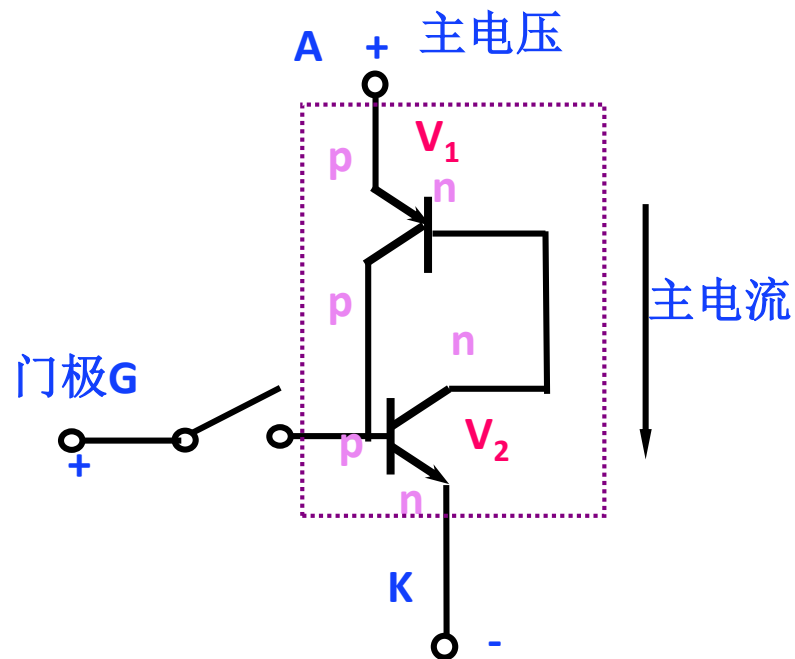
普通晶闸管，硅控整流器(SCR)



晶闸管导通条件:

在阳极A与阴极K之间加正向电压，同时在门极G与阴极K之间加正向电压（触发），这样阳极A与阴极K之间即进入导通状态。晶闸管一旦导通，只要阳极A与阴极K之间的电流不小于其维持电流 I_H ，门极G与阴极K之间是否还存在正向电压，对已经导通的晶闸管完全没有影响。

SCR等效电路

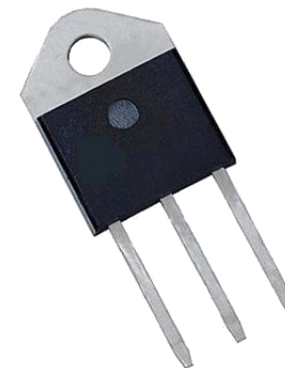


晶闸管关断条件:

主电极阳极A与阴极K之间的电流小于其维持电流 I_H ，晶闸管即进入关断状态。

常用功率器件

普通晶闸管，硅控整流器(SCR)



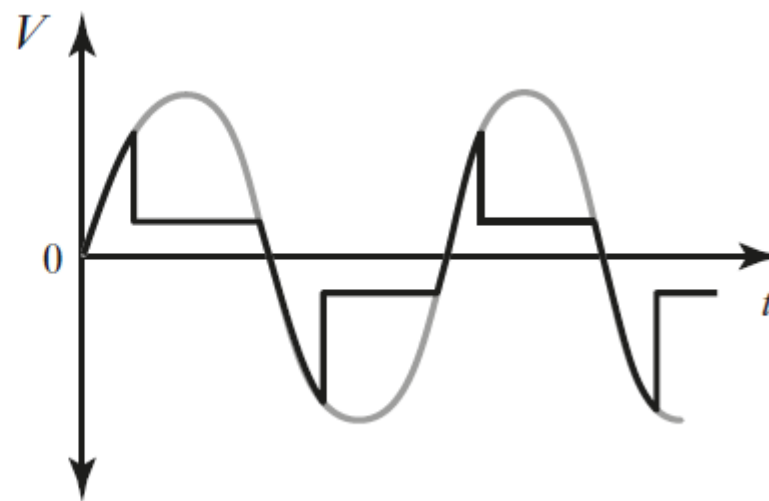
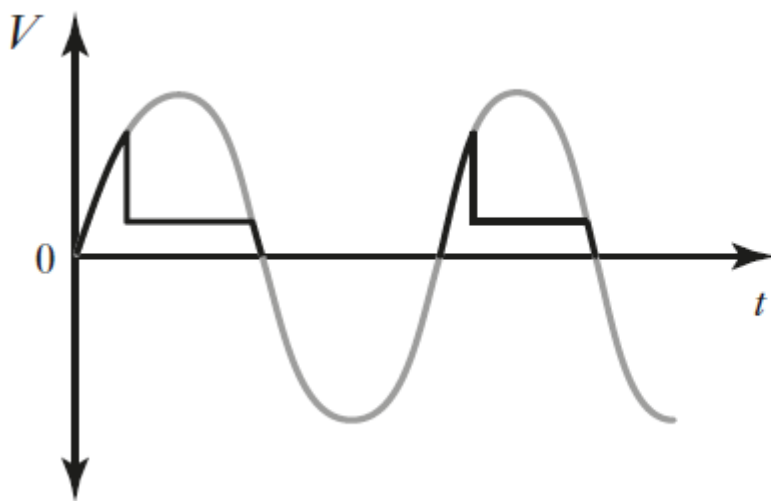
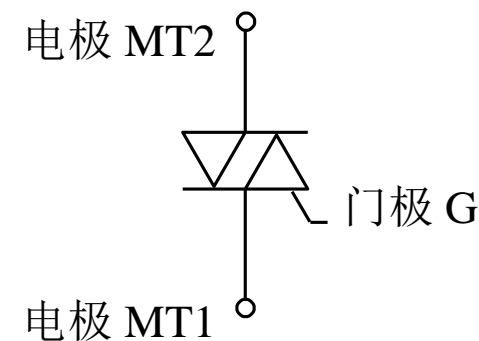
SCR外形图

常用功率器件

三端双向晶闸管 (TRIAC)

与单向晶闸管相比较，双向晶闸管的主要区别是：

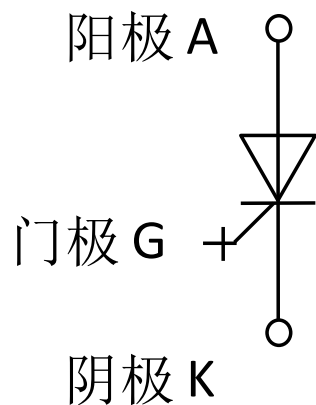
- ①在触发之后是双向导通的；
- ②触发电压不分极性，只要绝对值达到触发门限值即可使双向晶闸管导通。



加正弦交流电压

常用功率器件

可关断晶闸管**GTO**(Gate Turn off Thyristor)

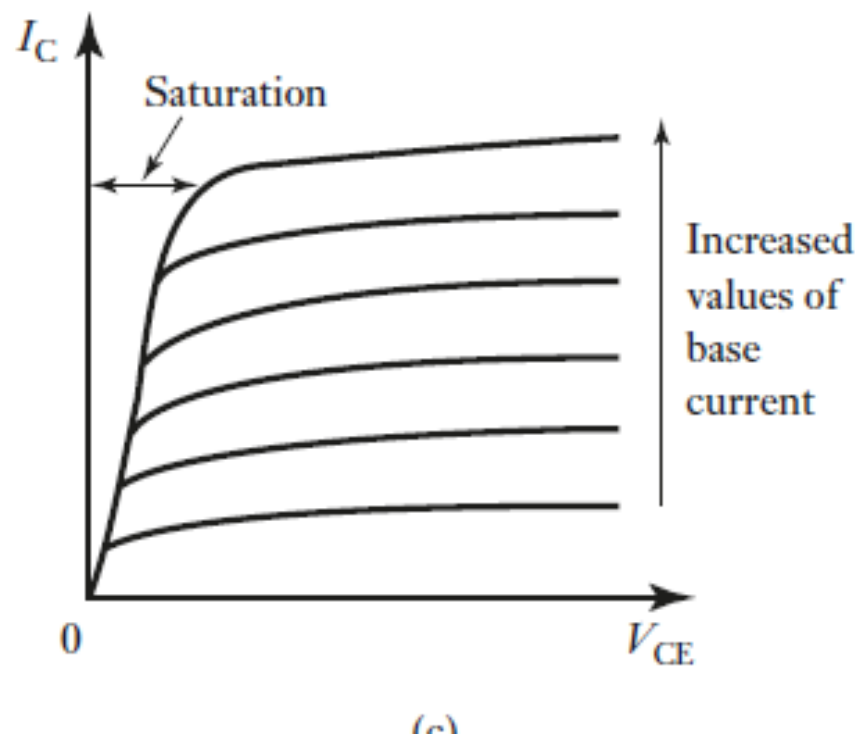
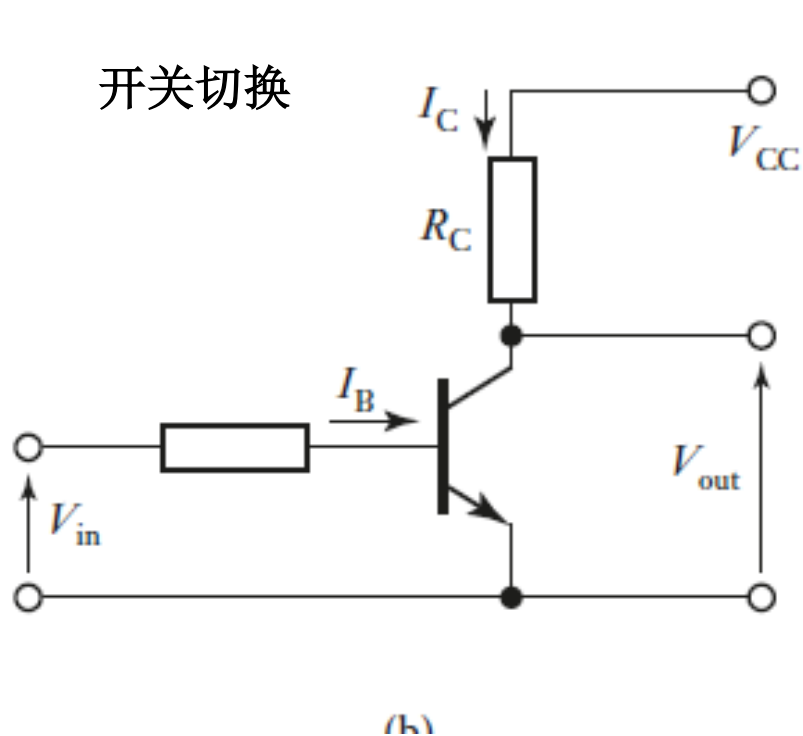


GTO是晶闸管的派生器件，是晶闸管家族的一个成员，**GTO**可以通过在门极施加负电流脉冲使其关断，属全控型器件。它的电压、电流容量比电力晶体管大的多，和晶闸管接近。

常用功率器件

功率晶体管（**GTR-Giant Transistor**）

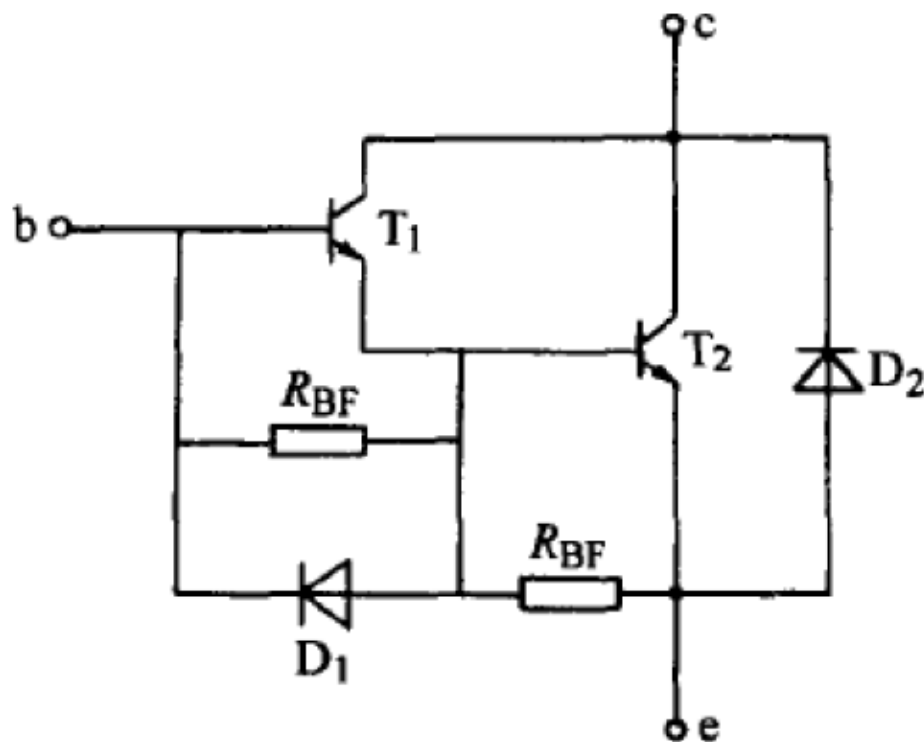
功率晶体管，即应用于大功率范围的晶体管。与晶闸管不同，功率晶体管是一种**线性功率元件**，可以工作在线性状态，但实际应用中常用作高速开关器件。



常用功率器件

功率晶体管（**GTR-Giant Transistor**）

功率晶体管的结构和工作原理与小功率晶体管非常相似，属双极型器件。



D1为加速二极管，D2为续流二极管。

常用功率器件

通过**控制基极电流**可实现双极型晶体管的开关，并且其开关频率可比晶闸管更高。但它的功率控制能力比晶闸管弱。



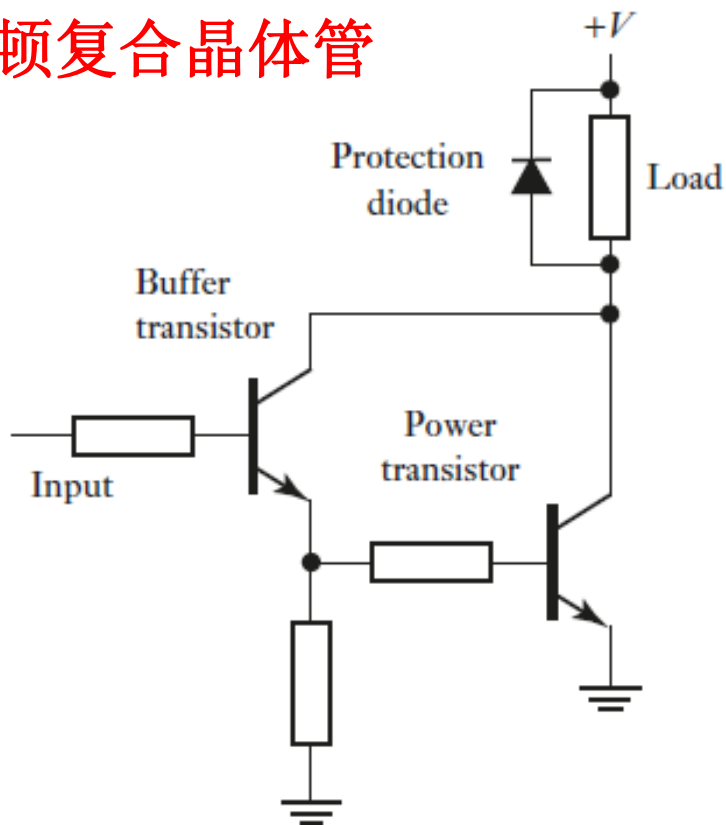
功率晶体管外形

常用功率器件

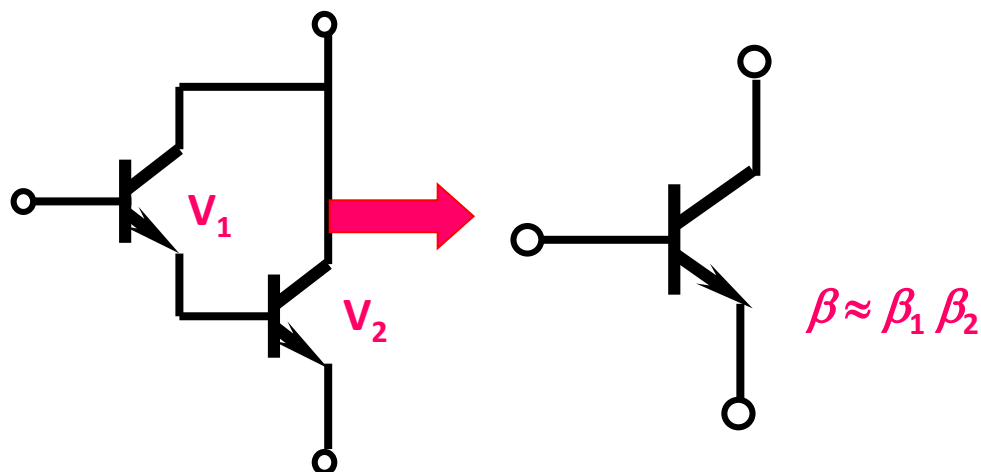
功率晶体管（**GTR-Giant Transistor**）

由于驱动一个双极型功率晶体管的基极电流相对较大，所以常需要第二个晶体管来对微处理器等提供的较小电流进行转换。

达林顿复合晶体管



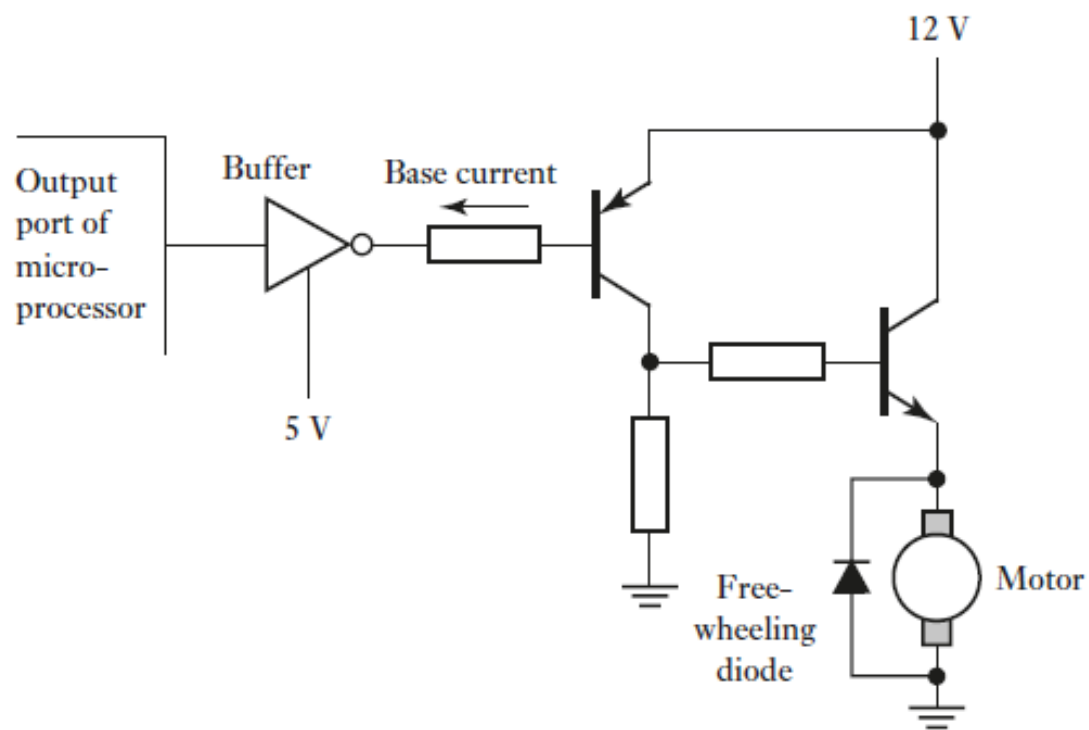
ULN2001



常用功率器件

功率晶体管（**GTR-Giant Transistor**）

在使用带有微处理器的晶体管开关驱动电路时，需要注意基极电流的大小和方向。由于要求的基极电流可能太大，因此会用到一个**缓冲器**。这个缓冲器把驱动电流提高到了所需要的值，也可能用来使电路反向。



常用功率器件

- 功率晶体管的应用

- **UPS不间断电源**：其逆变部分通常由功率晶体管组成。逆变效率可达**90%**。
- **直流电机调速控制**：通过在功率晶体管的基极上加上不同的控制信号，以控制其导通程度来实现。控制信号小，导通程度差，输出脉冲平均电压低，给直流电机的电压就低。反之，控制信号大，导通程度好，输出给直流电机的电压就高。

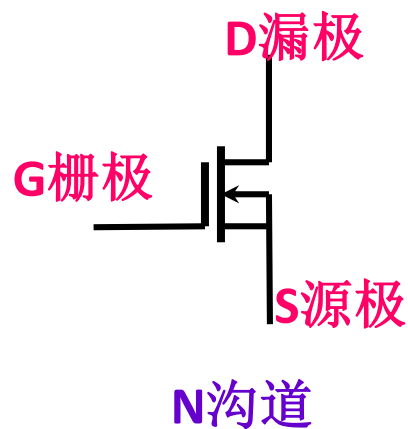
常用功率器件

功率场效应晶体管（功率**MOSFET**）（**MOSFET — Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor**）

功率场效应晶体管，即在大功率范围应用的场效应管。与双极型晶体管相比，具有开关速度快、可靠性高、过载能力强、开启电压高、输入阻抗高等优点，广泛应用于电机调速、开关电源等各种领域。

常用功率器件

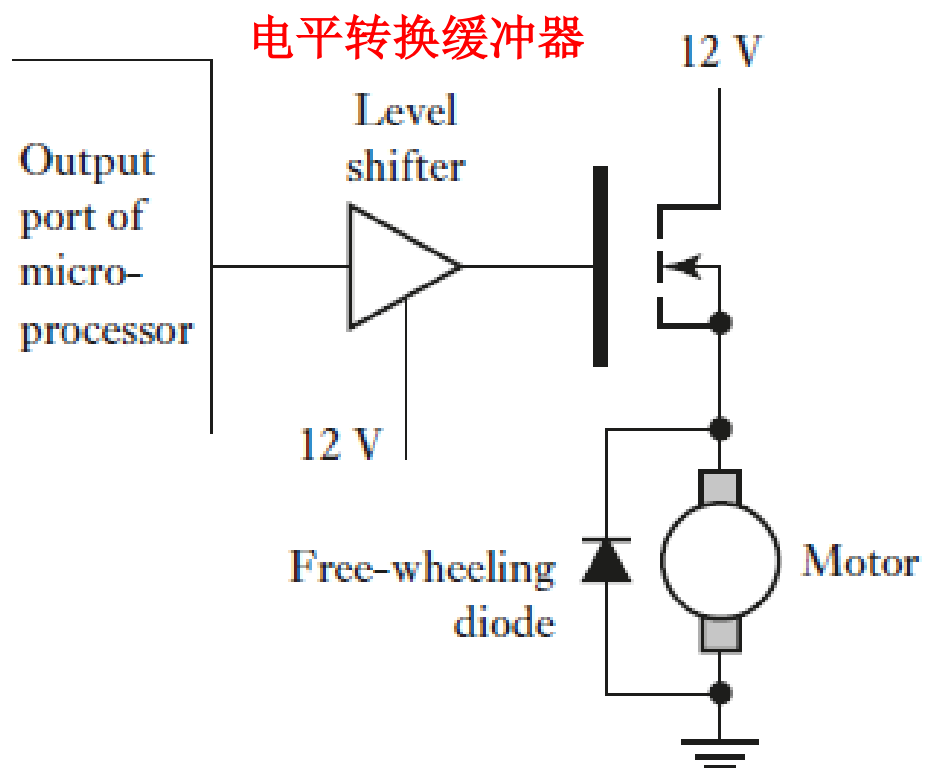
功率场控晶体管（功率MOSFET）（MOSFET — Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor）



功率**MOSFET** 如同普通**MOSFET**一样，也是一种单极型晶体管，是**电压控制型**，属全控型器件。它是用栅极电压控制漏极电流，因此**驱动电路简单**，驱动功率小。开关速度快，**频率高**，它在所有的电力电子器件中是最高的。

常用功率器件

功率场控晶体管（功率**MOSFET**）（**MOSFET** — **Metal Oxide Silicon Field Effect Transistor**）



常用功率器件

功率**MOSFET**的驱动方式

(1) **TTL**驱动：小功率的**TTL**集成电路足以驱动大功率的场效应晶体管。通常采用集电极开路的**TTL**集成电路，为了提高输出驱动电平的幅值，可以通过一个上拉电阻接到**+5V**电源。为了保证它能迅速截止，实际上是把上位电阻接到**10—15V**电源上。

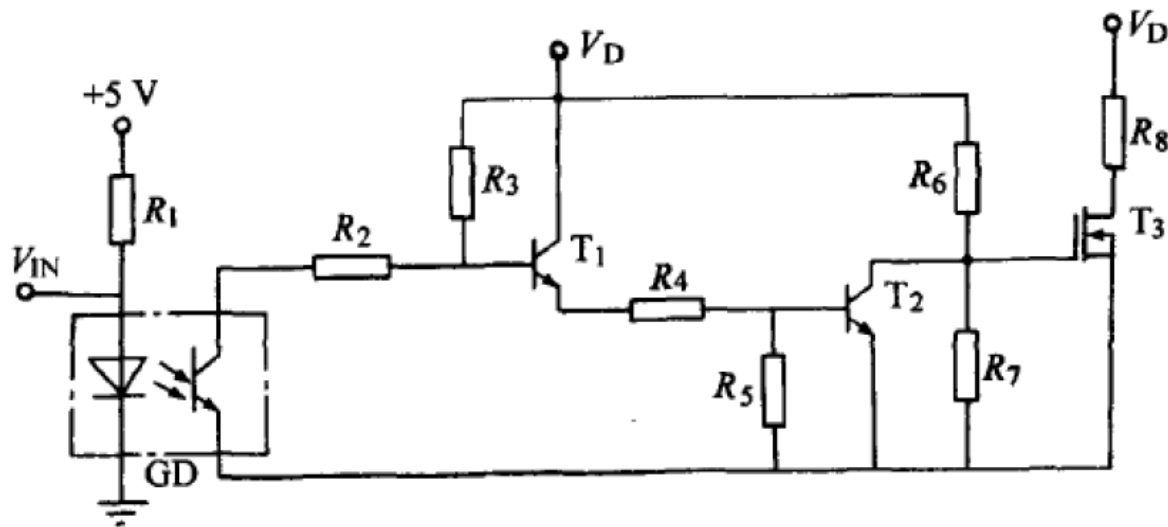
(2) **CMOS**驱动：用**CMOS**集成电路直接驱动功率场效应晶体管有一个最明显的优点是无需附加电路和上拉电阻，可采用**10—15V**的电压源，使其在导通时处于充分导通状态。

(3) 隔离式驱动

常用功率器件

功率MOSFET的驱动方式

- (1) **TTL**驱动
- (2) **CMOS**驱动
- (3) 隔离式驱动：隔离式驱动是驱动电路与功率场效应管的电源系统采用**2个**完全无公共点的电源系统，这样可以消除电气干扰。

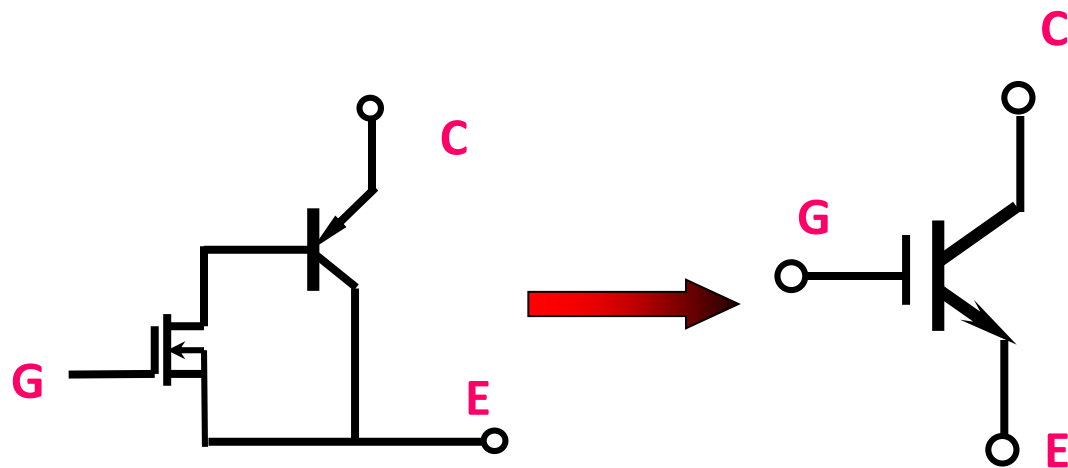


常用功率器件

绝缘门极双极晶体管（**IGBT**）

IGBT是双极型电力晶体管与MOSFET的复合。电力晶体管饱和压降小，载流密度大，但是驱动电流大；MOSFET驱动功率很小，开关速度快，但是导通压降大载流密度小。

IGBT综合了以上两种器件的优点，驱动功率小而饱和压降低。



常用功率器件

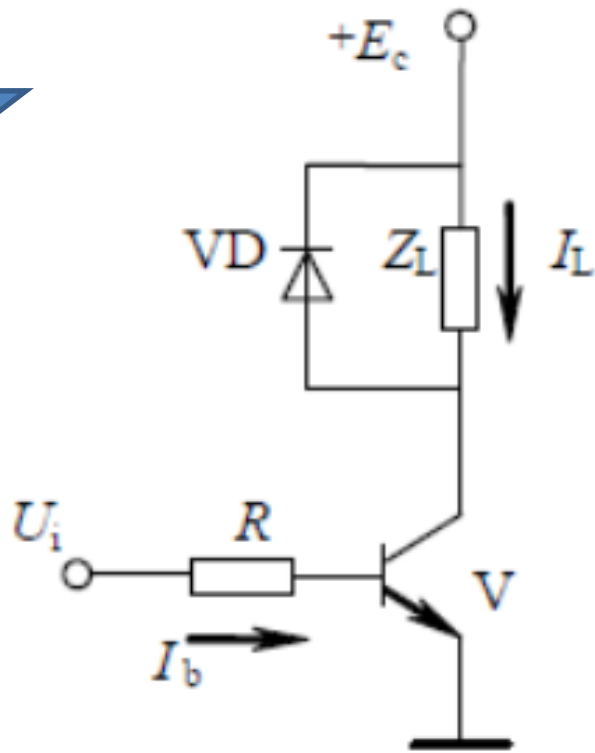
各种电力器件性能比较

性能 名称	载流量	驱动功率	工作频率	半/全 控	用 途
SCR	最大	大	1KHZ以下	半控	用于大容量 整流和交交 变频器
GTO	大	大	1—2KHZ	全 控	用于整流、 交一直一交 变频器、斩 波器
GTR	较大	较大	10KHZ以下		
功率 MOSFET	较小	小	100KHZ以上		
IGBT	较大	小	100KHZ以上		

功率开关驱动电路

- 按照电路中所采用的**功率器件类型**分类，常见的有晶体管驱动电路、场效应晶体管驱动电路和晶闸管驱动电路等类型。
- 按照电路所驱动的**负载类型**分类，常见的有电阻性负载驱动电路和电感性负载驱动电路等类型。
- 按照电路所控制的**负载电源类型**分类，常见的有直流电源负载驱动电路和交流电源负载驱动电路等类型。

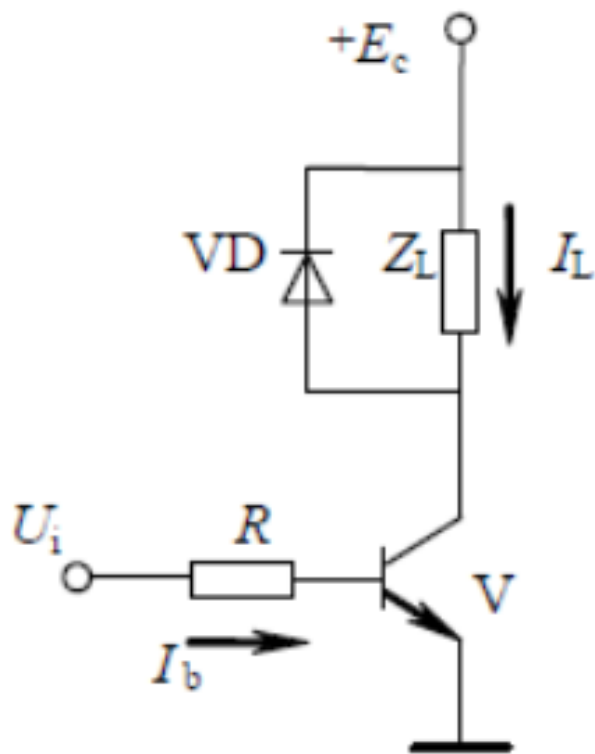
晶体管直流负载功率驱动电路



如果负载所需的电流不太大，可采用如图所示的晶体管直流负载功率驱动电路。这里负载用 Z_L 而不用 R_L 表示，是强调该负载可以是电阻性负载，也可以是电感或电容性负载。

当控制信号 U_i 为低电平时， I_b 较小导致 V 截止，负载 Z_L 中电流 I_L 为0；当控制信号 U_i 为高电平时， I_b 较大 V 导通（工作于饱和区），负载 Z_L 中电流 $I_L = (E_c - U_{ce}) / Z_L$ ， U_{ce} 为 V 集电极与发射极间的饱和电压降。图中 VD 是续流二极管，对晶体管 V 起保护作用。当驱动感性负载时，在晶体管关断瞬间，感性负载所存储的能量可通过 VD 的续流作用而泄放，从而避免 V 被反向击穿。

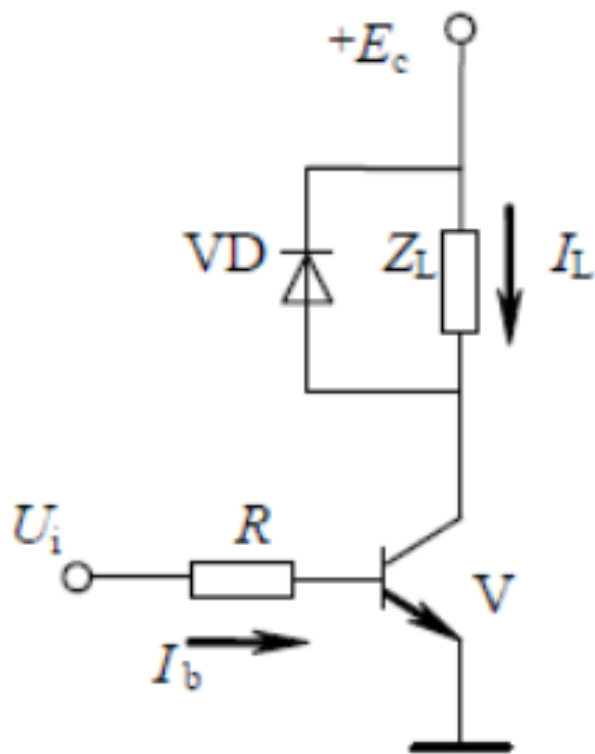
晶体管直流负载功率驱动电路



这种电路的设计要点是合理确定 U_i 、 R 与 V 的电流放大系数 β 值之间的数值关系，充分满足 $I_b > I_L / \beta$ ，可确保 V 导通时工作于饱和区，以降低 V 的导通电阻及减小功耗。

这种由一只晶体管组成的功率驱动电路，可满足负载电流 $I_L < 500\text{mA}$ 电器的需要。通常情况下可采用3DG102或T8050等晶体管组成这种电路。

晶体管直流负载功率驱动电路



当所需的负载电流 I_L 较大时，由于单个晶体管 β 值有限，输入控制信号电流 I_b 必须很大，以确保 V 导通时工作于饱和区。为减小对控制信号电流强度的要求，可采用达林顿器件（通常也称复合晶体管）构成功率驱动电路。

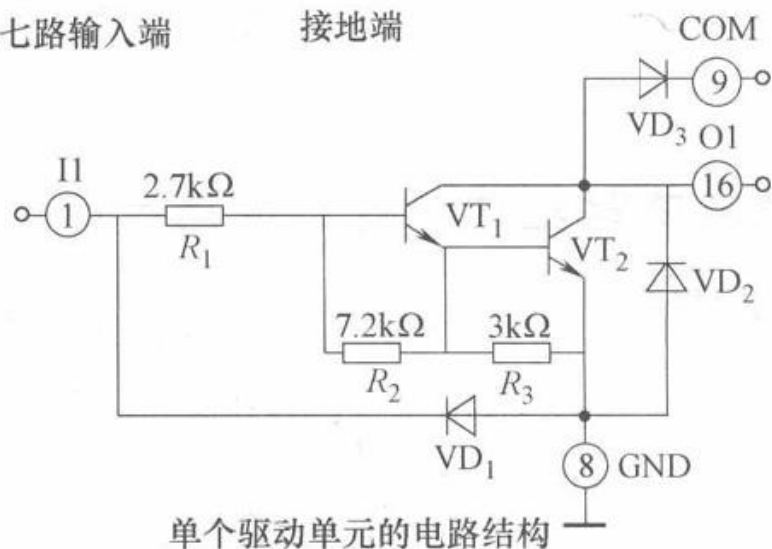
采用达林顿器件可实施对0.5~15A负载电流的功率驱动。常用的器件有2S6039、BD651、S15001等。

七路大电流达林顿晶体管驱动芯片及应用电路



主要参数:

- ① 直流放大倍数最小可达1000
- ② VT_1 、 VT_2 耐压最大为50V
- ③ VT_2 的最大输出电流(I_{C2})为500mA
- ④ 输入端的高电平的电压值不能低于2.8V
- ⑤ 输出端负载的电源推荐在24V以内



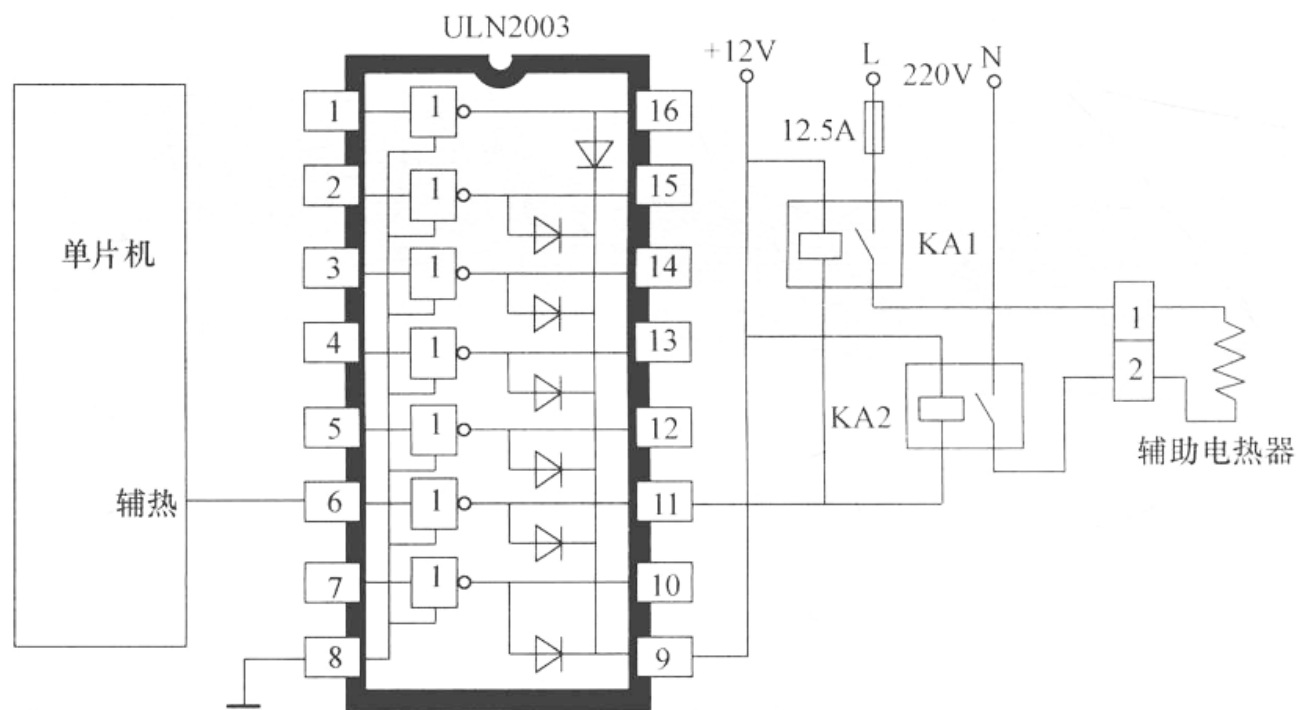
单个驱动单位的电路结构

ULN2003是一个由7个达林顿管（复合晶体管）组成的七路驱动放大芯片，在5V的工作电压下能与TTL和CMOS电路直接连接。

ULN2003与MC1413P、KA2667、KA2657、KID65004、MC1416、ULN2803、TD62003和M5466P等，都是16引脚的反相驱动集成电路，可以互换使用。

ULN2003封装形式主要有双列直插式和贴片式，其外形如图所示。

七路大电流达林顿晶体管驱动芯片及应用电路



空调器辅助电热器控制电路

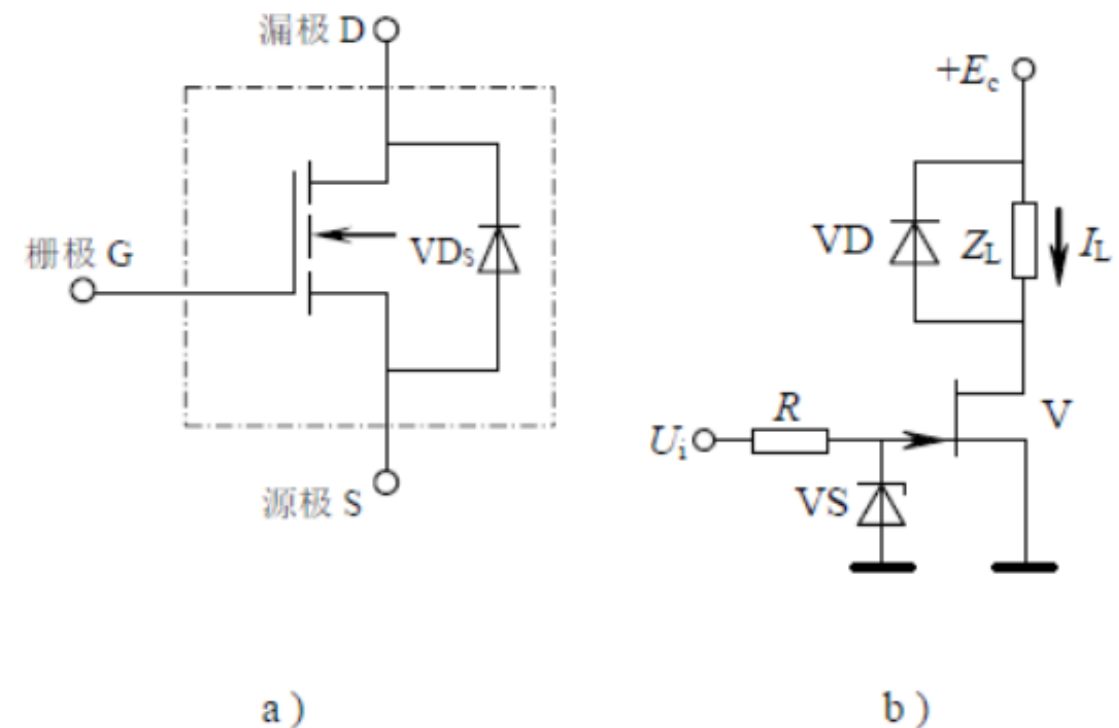
当室外温度很低（0℃左右）或人为开启辅助电热功能时，单片机从辅热控制脚输出高电平，ULN2003的6、11脚之间的内部晶体管导通，KA1、KA2继电器线圈均有电流通过，KA1、KA2的触点均闭合，L、N线的电源加到辅助电热器的两端，辅助电热器有电流过而发热。在辅助电热器供电电路中，一般会串联10A以上的熔断器，当流过电热器的电流过大时，熔断器熔断，有些辅助电热器上还会安装热保护器，当电热器温度过高时，热保护器断开，温度下降一段时间后会自动闭合。

场效应晶体管直流负载功率驱动电路

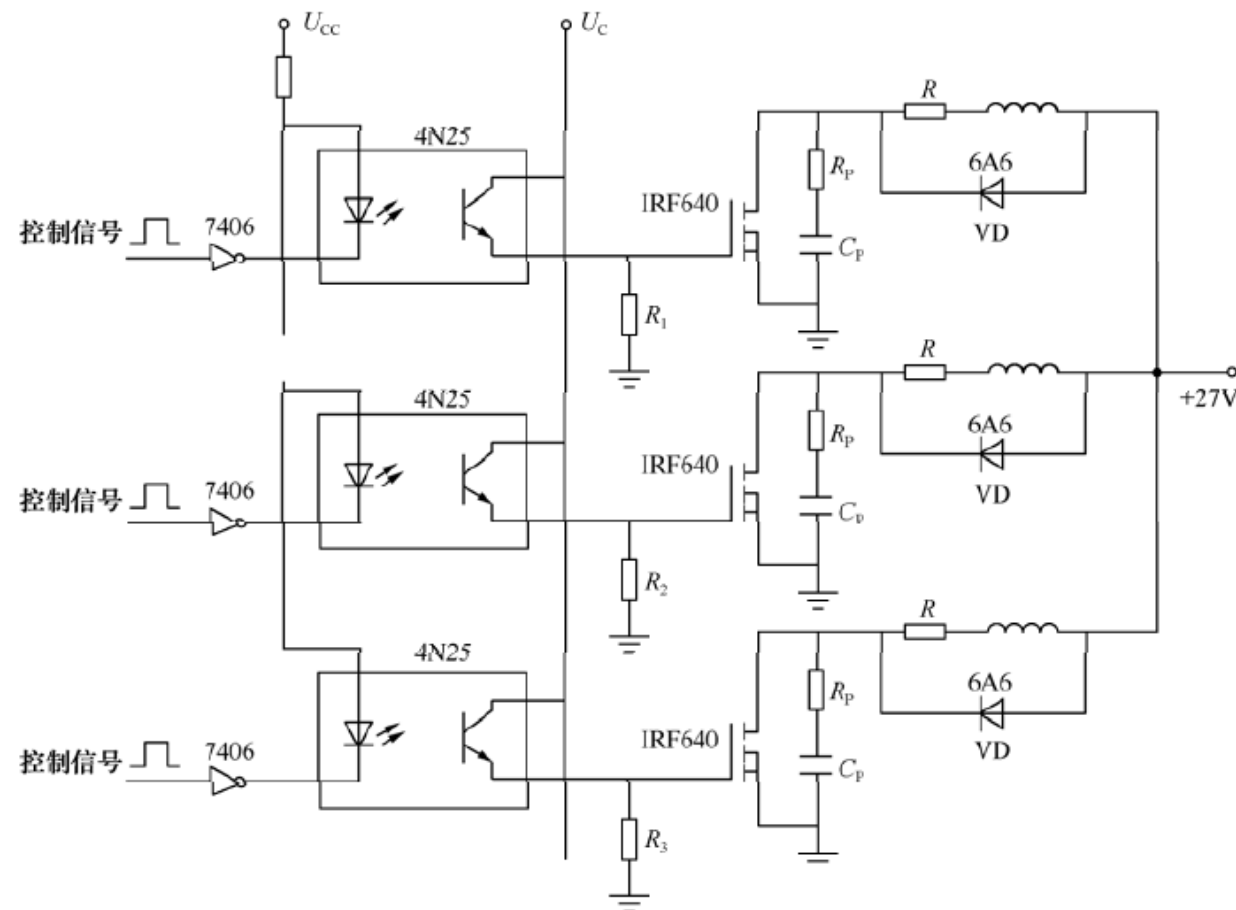
图 a 是 VMOS 场效应晶体管引出电极的内部关系简图，点画线框表示其封装范围。其中二极管 V_{DS} 是在制造过程中形成的。与普通场效应晶体管不同，如果在使用中将漏极 D 与源极 S 接反，会导致性能丧失或损坏。

图 b 为典型的功率场效应晶体管直流负载功率驱动电路。

当控制信号 U_i 小于开启电压 U_{GS} 时， V 截止，直流负载 Z_L 中电流 I_L 为 0；当控制信号 U_i 大于开启电压 U_{GS} 时， V 导通，直流负载 Z_L 中电流 $I_L = E_c / (Z_L + R_{DS})$ 。式中 R_{DS} 为 V 漏极 D 与源极 S 间的导通电阻。电路中稳压二极管 VS 用来对输入控制电压钳位，对功率场效应晶体管实施保护。



场效应晶体管直流负载功率驱动电路



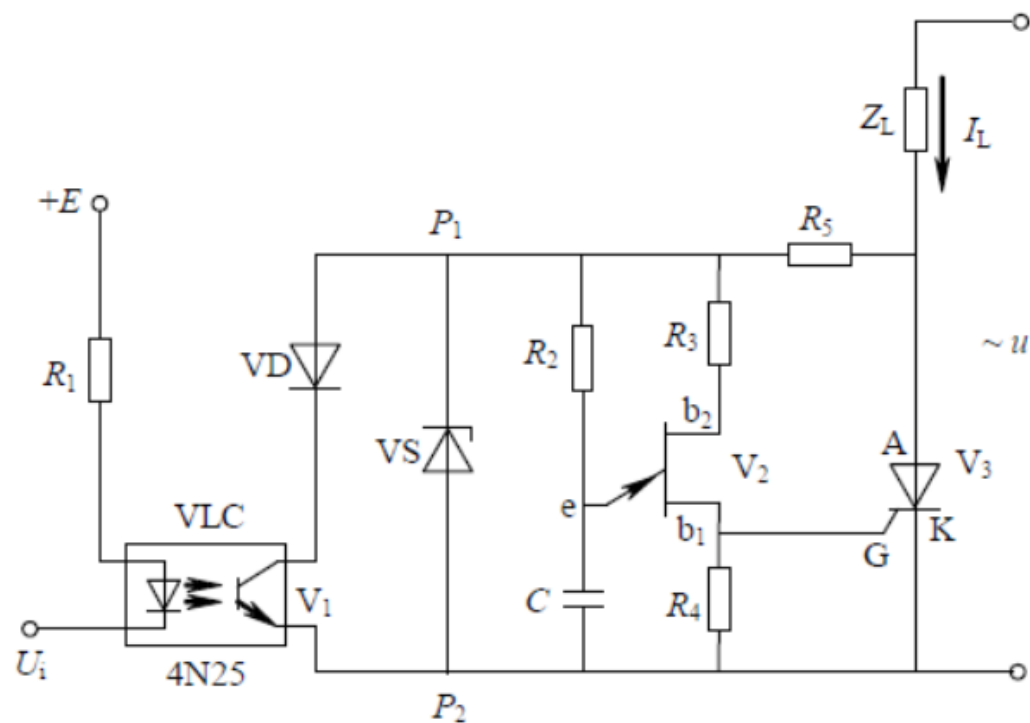
场效应管的种类非常多，如IRF系列，电流可从几毫安到几十安培，耐压可从几十伏到几百伏，因此可以适合各种场合。

常用的功率场效应晶体管有IRF250、IRF350、IRF640等。值得说明的是，由于大功率场效应管本身没有隔离作用。故使用时为了防止高压对微型计算机系统的干扰和破坏，通常在它的前边加一级光电隔离器，如4N25、TIL113等。

利用大功率场效应管实现步进电动机控制

晶闸管交流负载功率驱动电路

交流半波导通功率驱动电路



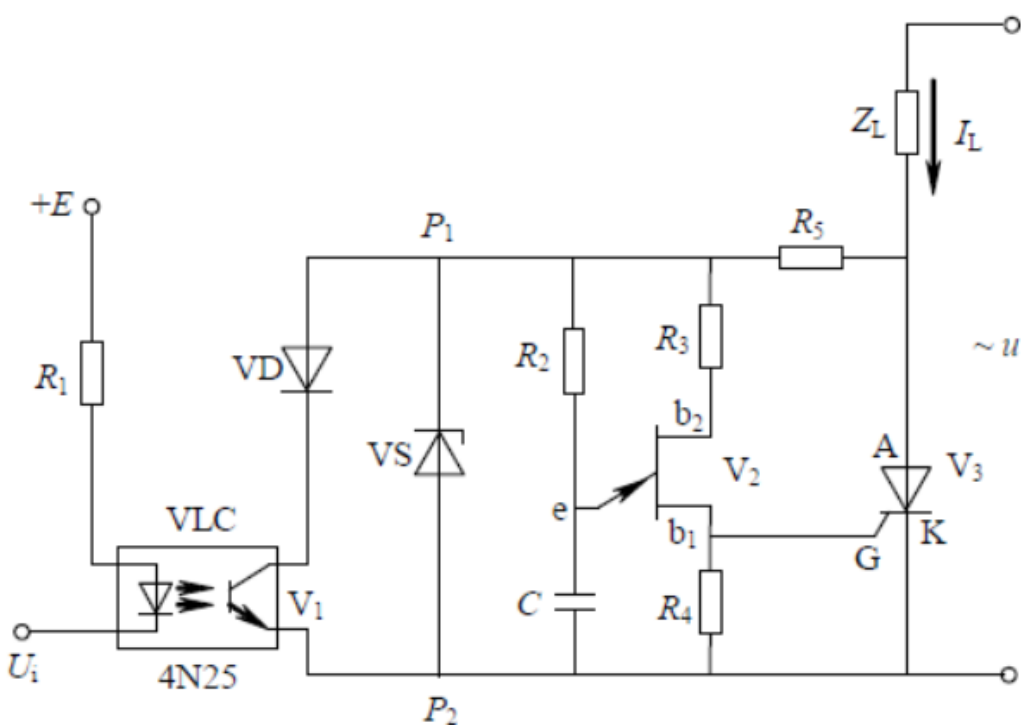
交流负载的功率驱动电路，通常采用晶闸管来构成。晶闸管有单向晶闸管和双向晶闸管两种类型。

如图所示为交流半波导通功率驱动电路。其中 V_2 是单结晶体管，负载 Z_L 与晶闸管 V_3 串联后接于交流电源 u 上。

当控制信号 U_i 为高电平时，晶闸管 V_3 导通，负载 Z_L 中有半波交流电流， I_L 通过。当控制信号 U_i 为低电平时，晶闸管 V_3 截止，负载 Z_L 中电流 I_L 为0。

晶闸管交流负载功率驱动电路

交流半波导通功率驱动电路



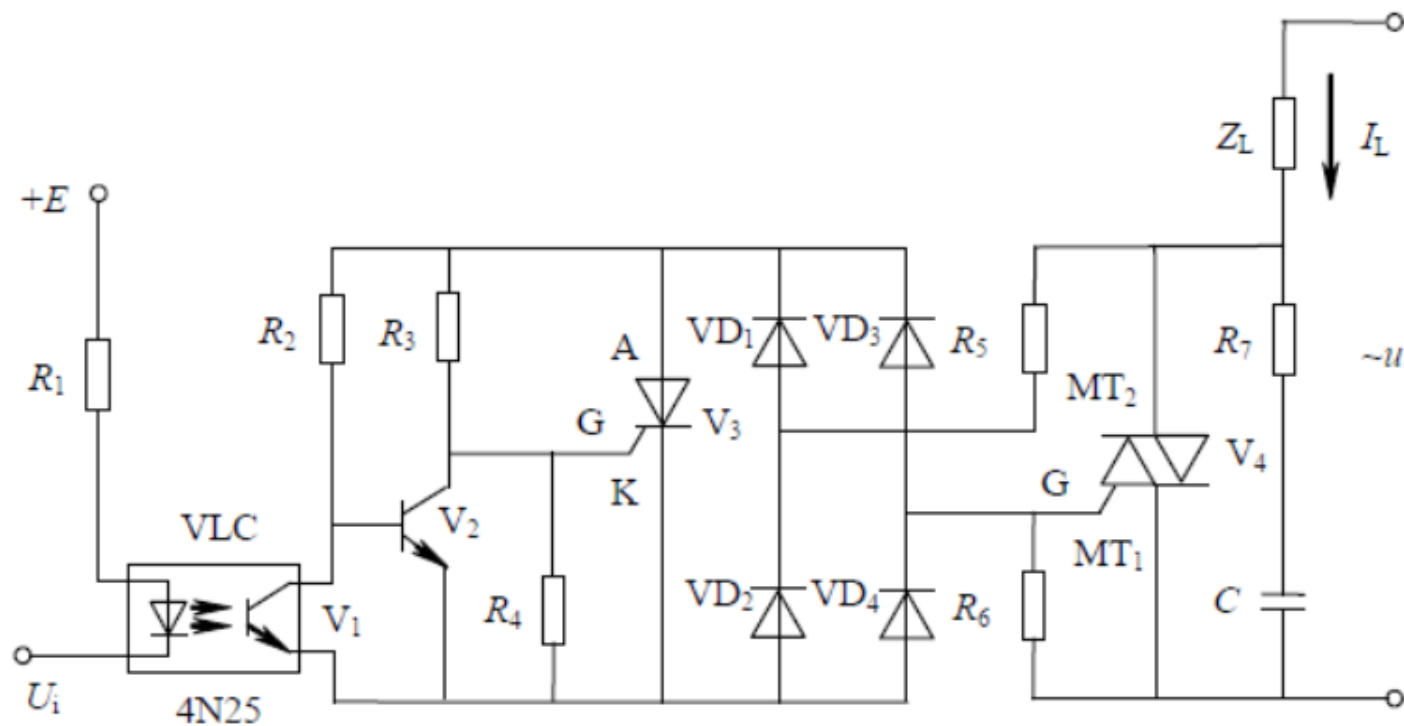
当控制信号 U_i 为高电平，光耦合器VLC中二极管无电流而不发光，使得光敏晶体管V1截止，在 u 的正半周，P1与P2间的电压使电容C上的电位逐渐增加到足够高，导致单结晶体管V2的射极e与第一基极b1间突然导通。e与b1的导通一方面提供正向触发脉冲使晶闸管V3导通，另一方面使电容C上的电位迅速降低为0。此后晶闸管V3的导通状态一直延续到 u 的正半周基本结束。这时因 u 接近零而使晶闸管V3中的电流 $I_L < I_H$ ，晶闸管V3进入截止状态。在 u 的负半周，因晶闸管A、K电极间为反向电压，不满足导通条件，晶闸管V3仍处于截止状态。直至 u 的下一个正半周，晶闸管V3再触发导通。

如果控制信号 U_i 为低电平，光耦合器VLC中发光二极管导通发光，使得光敏晶体管V1导通，P1与P2间电位差显著降低，单结晶体管V2无法建立使晶闸管V3导通的触发电平，因而负载ZL中的电流 I_L 始终为0。

调整C与R2的数值，可改变晶闸管V3在u正半周的导通角，从而达到改变负载ZL中平均电流IL大小的目的。

晶闸管交流负载功率驱动电路

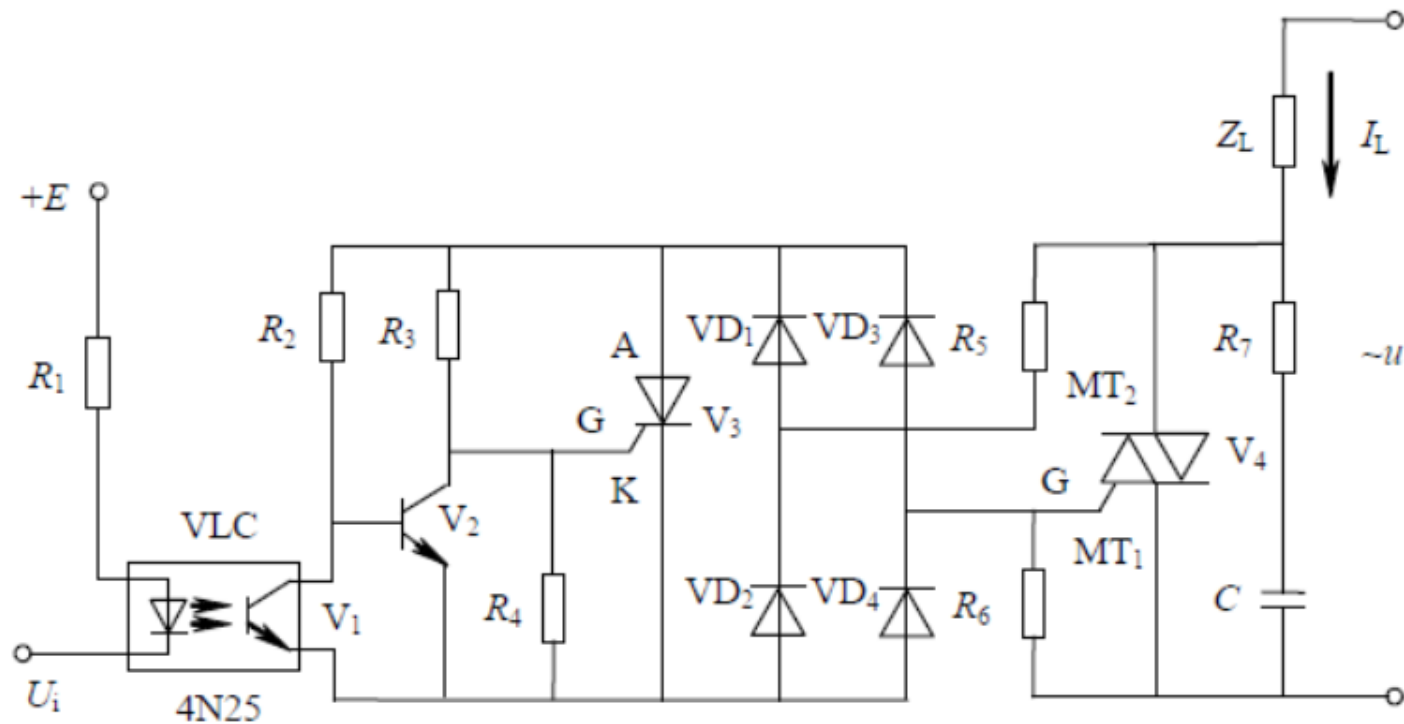
交流全波导通功率驱动电路



其中 V_2 是普通晶体管， V_3 是单向晶闸管。 $VD_1 \sim VD_4$ 既构成全桥整流器，又是双向晶闸管 V_4 触发电流通路的一部分。负载 Z_L 与双向晶闸管 V_4 串联后接于交流电源 u 上。

晶闸管交流负载功率驱动电路

交流全波导通功率驱动电路



当控制信号Ui为高电平，光耦合器VLC中二极管无电流而不发光，使得光敏晶体管V1截止，晶体管V2导通，单向晶闸管V3因其门极G与阴极K间电压不足于触发导通而处于截止状态。由此，导致双向晶闸管V4的门极G与主电极MT1之间电压也不足于触发，双向晶闸管V4处于关断状态。

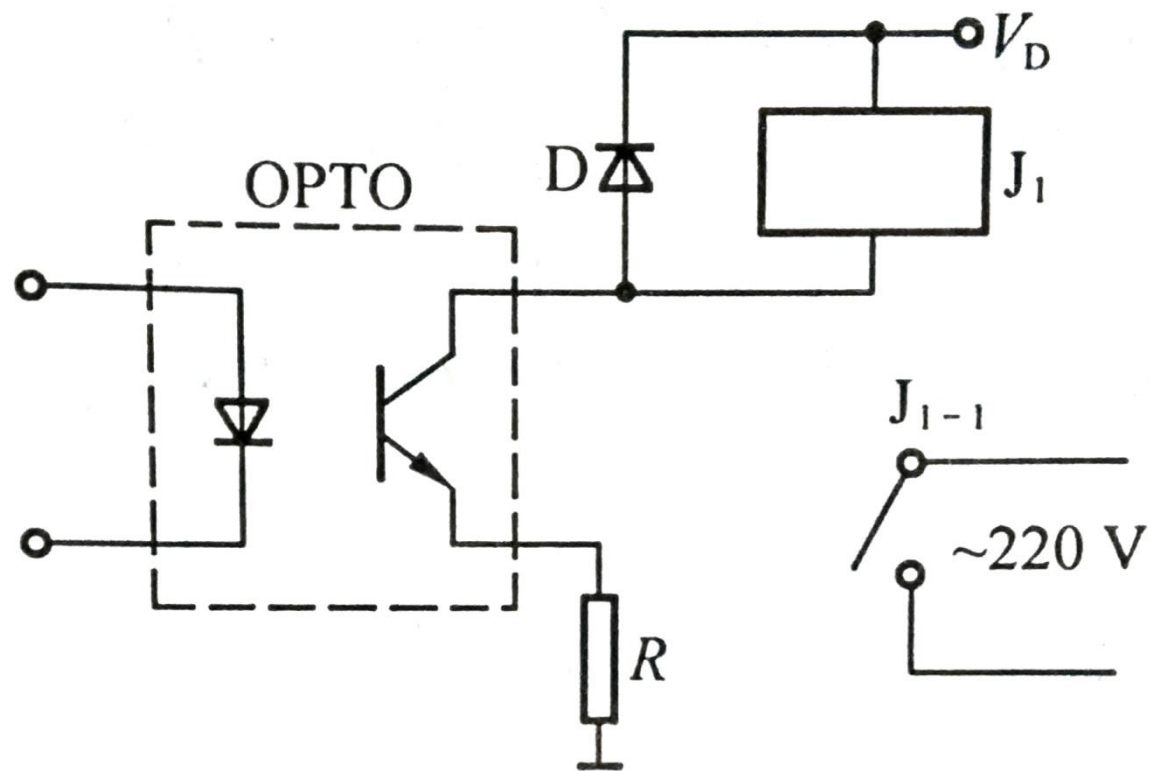
当控制信号 U_i 为低电平，光耦合器VLC中发光二极管导通发光，使得光敏晶体管V1导通，晶体管V2截止，单向晶闸管V3因其门极G与阴极K间电压升高而触发导通。由此，为双向晶闸管V4的门极G与主电极MT1之间电压升高提供通路，使双向晶闸管V4触发而处于导通状态。负载ZL中有全波交流电流 I_L 通过。

继电器的驱动电路

- 对继电器或接触器的驱动，实际上是对其励磁线圈电流通断的控制。
- 继电器励磁线圈所需的励磁电源有直流与交流两种。直流继电器所需的电源有**6V、12V、24V**等，交流的有**220V、380V**等。

继电器的驱动电路

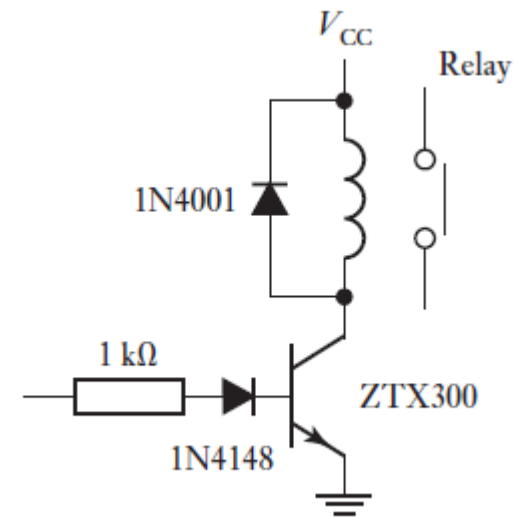
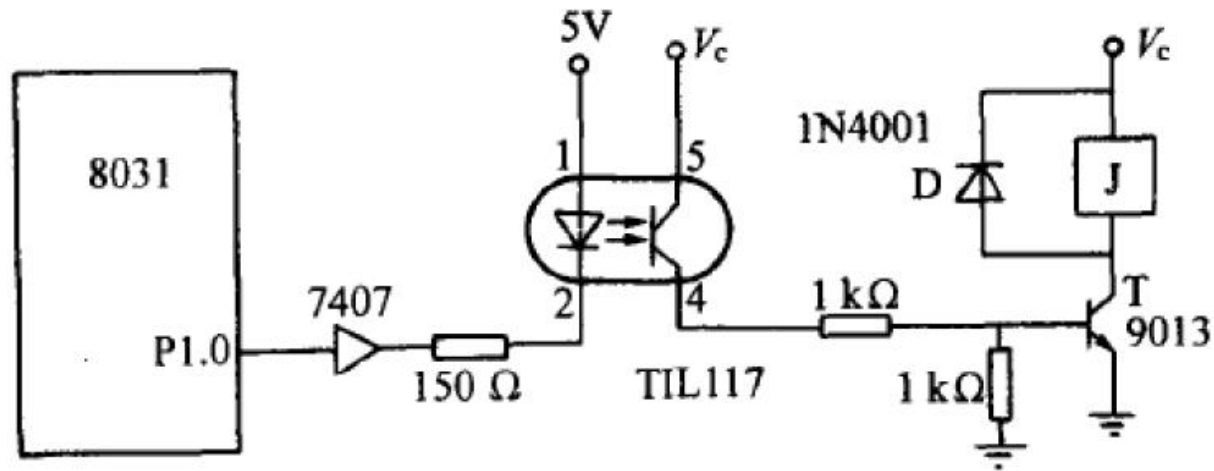
对需用直流电源励磁的继电器，可以用前述的直流负载驱动电路。此时继电器的励磁线圈即是电路中的负载 z_L ，要注意励磁线圈是感性负载，泄流二极管是必不可少的。



为了提高系统可靠性，在计算机和继电器之间都用光电耦合器隔离。

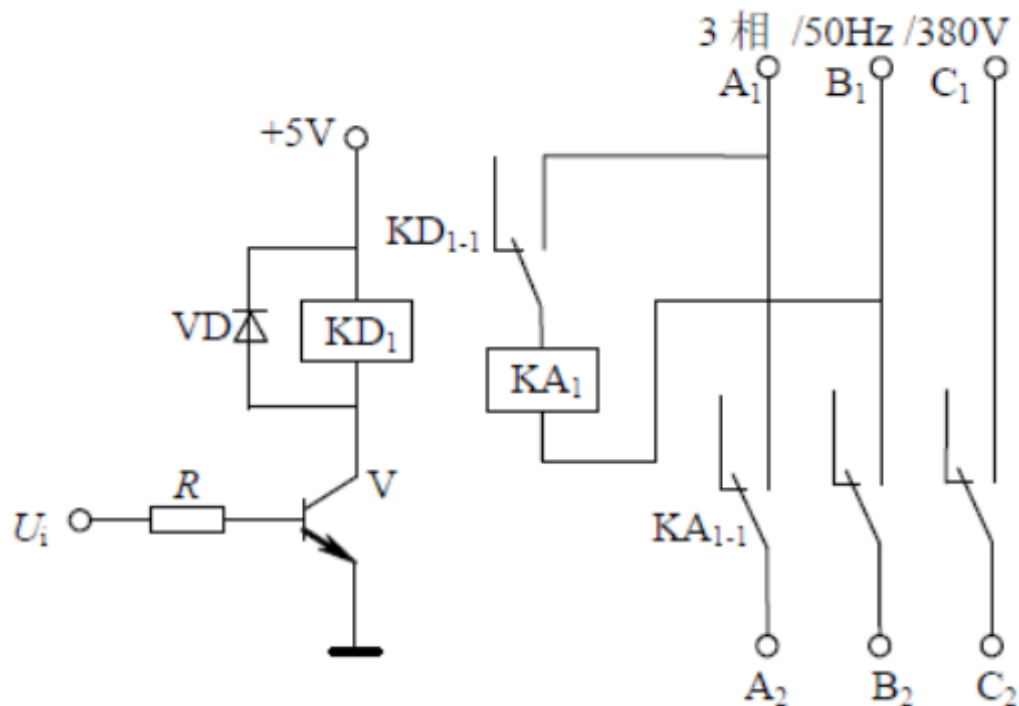
继电器的驱动电路

直流电磁式继电器一般用功率接口集成电路或晶体管驱动。如集成电路SN75468。



继电器的驱动电路

- 对需用交流电源励磁的继电器，可以用前述的交流负载驱动电路。交流负载驱动电路比直流负载驱动电路复杂。在没有特殊要求时，为了便利和简化电路，可通过直流继电器来间接控制交流继电器。

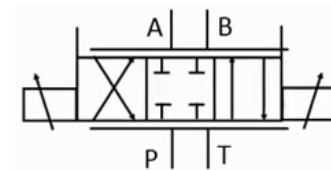
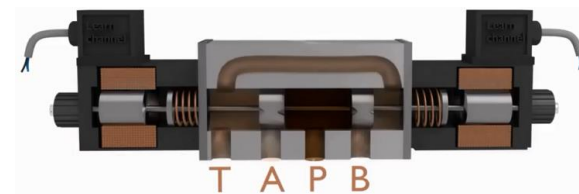
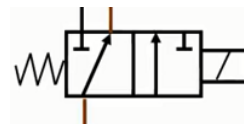
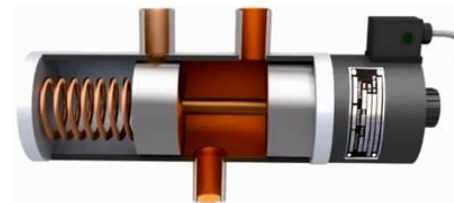
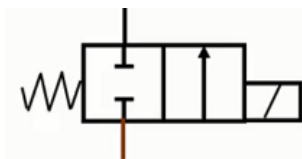
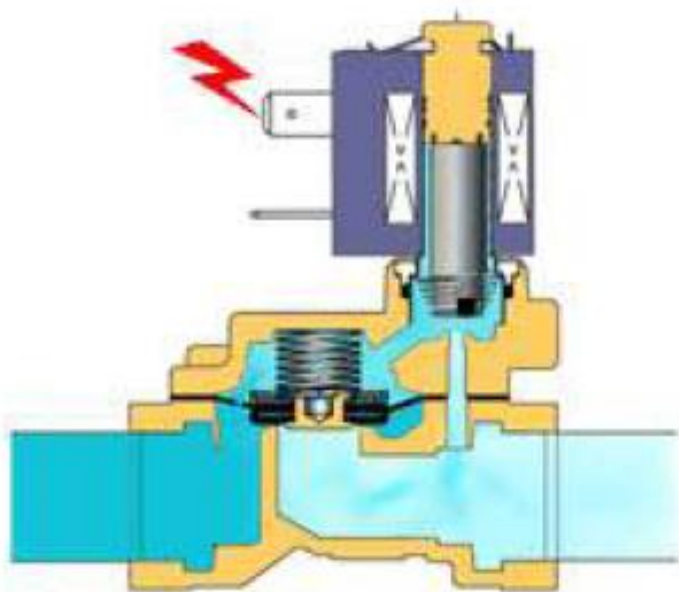


电磁阀驱动电路

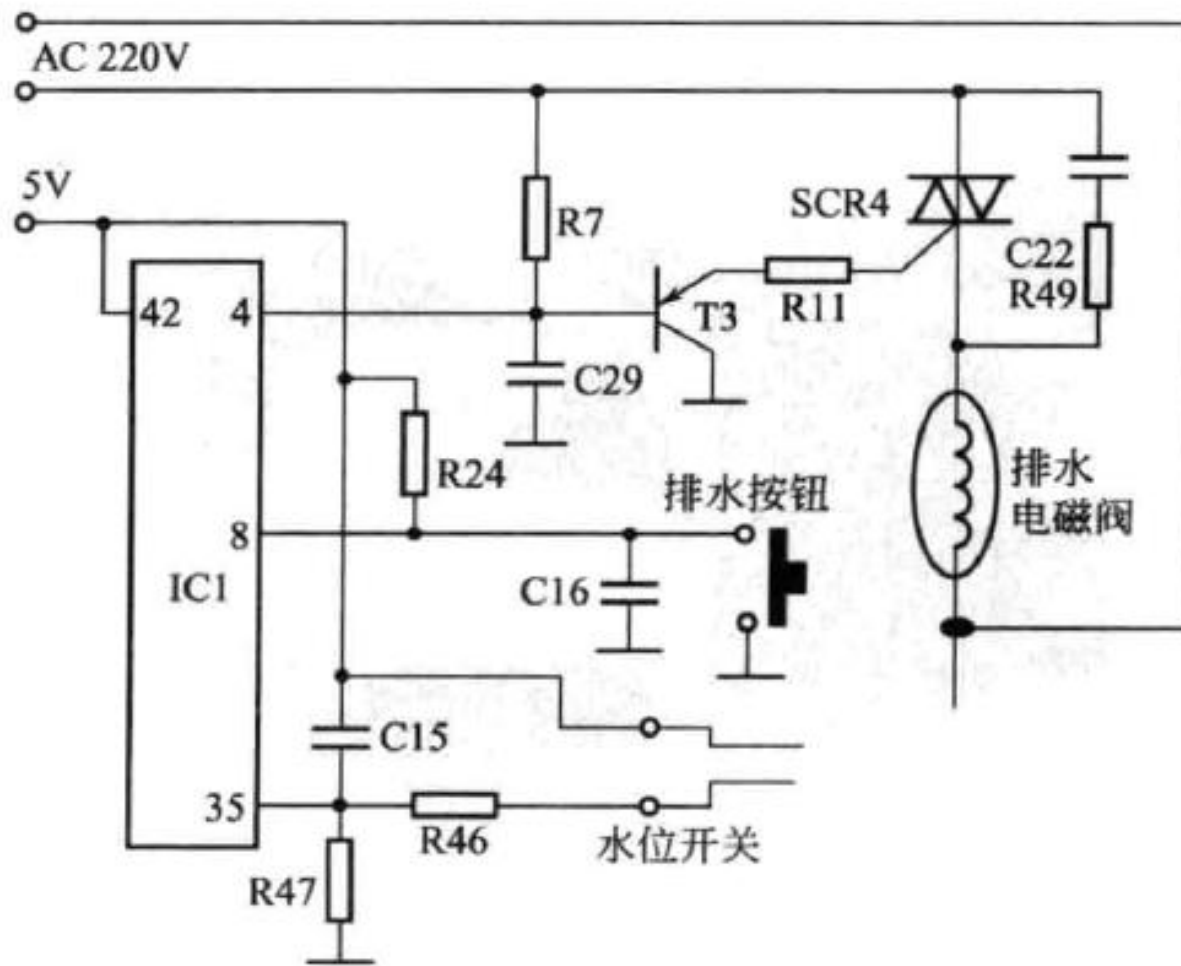
- 电磁阀的动作驱动与继电器完全相同，都是感性负载，也有直流和交流两种电源类型。用前述的类似方法，可实施对电磁阀的动作驱动。

电磁阀驱动电路

- 典型电磁阀



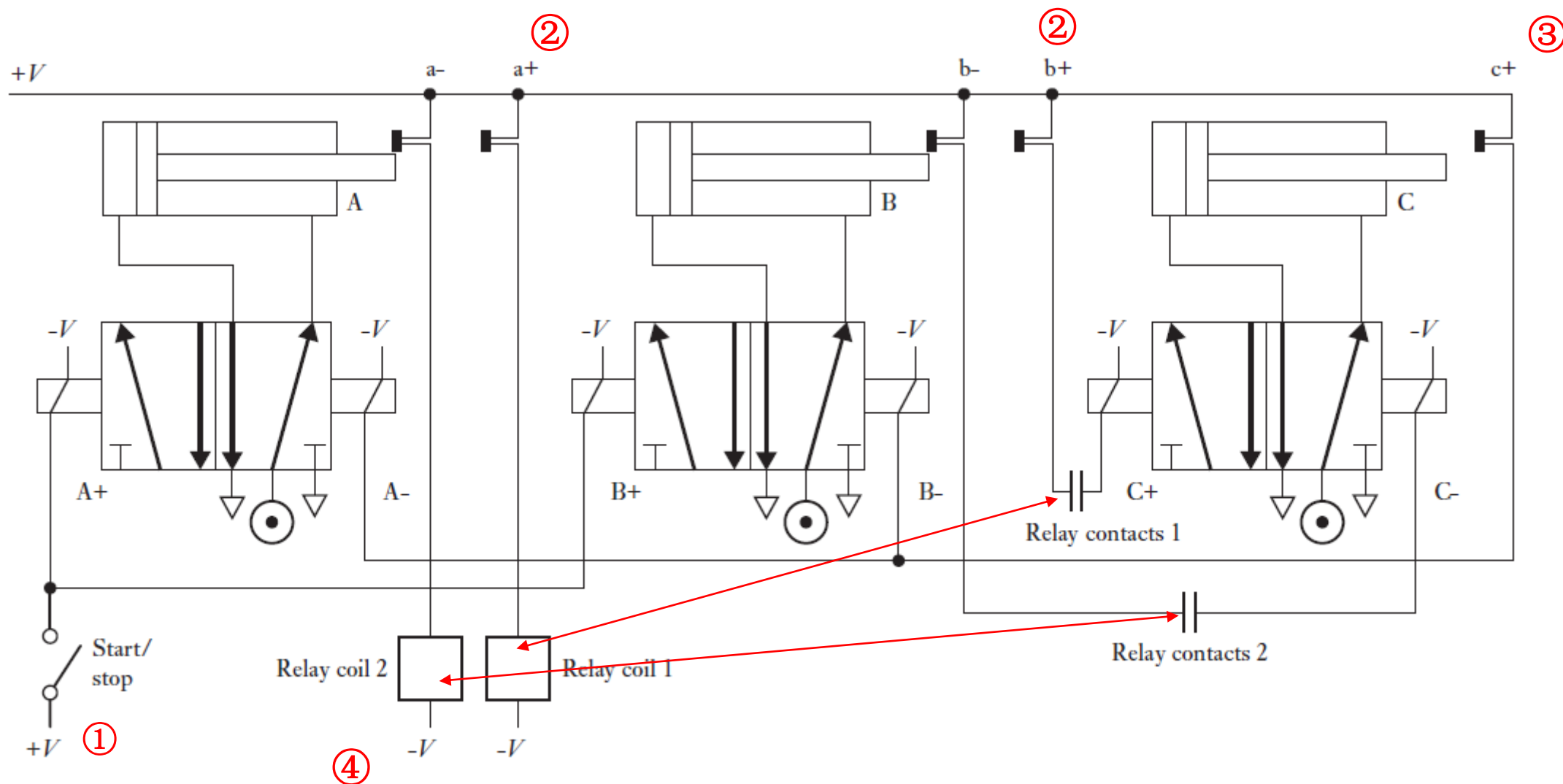
电磁阀驱动电路



排水控制电路由水位开关、微处理器IC1、排水电磁阀、双向晶闸管SCR4、驱动管T3等构成。

洗涤结束后，按排水键使IC1的8脚电位变为低电平，IC1检测到用户发出的排水指令后，控制4脚输出驱动信号。该信号通过C29滤波，使双向晶闸管SCR4导通，为排水电磁阀的线圈供电，使其产生磁场后，阀门在磁场的作用下打开排水。当水排净后，水位开关断开，使IC1的35脚电位变为高电平，IC1判断出水被排净，切断4脚输出的触发信号，使SCR4截止，排水结束。

继电器控制的电磁液压阀



继电器控制的电磁液压阀

1 When the start switch is closed, current is applied to the A and B solenoids and results in both A and B extending, i.e. A+ and B+.

2 The limit switches a+ and b+ are then closed; the a+ closure results in a current flowing through relay coil 1 which then closes its contacts and so supplies current to the C solenoid and results in it extending, i.e. C+.

3 Its extension causes limit switch a- to close and so current to switch the A and B control valves and hence retraction of cylinders A and B, i.e. A and B-.

4 Closing limit switch a- passes a current through relay coil 2; its contacts close and allow a current to valve C and cylinder C to retract, i.e. C-.

The sequence thus given by this system is A+ and B+ concurrently, then C+, followed by A- and B- concurrently and finally C-.