

第 6 章 控制电机及其控制系统

动力电机与控制电机

控制电机是在普通旋转电机的基础上发展起来的，其基本原理与普通旋转电机并无本质区别。

普通电机的主要任务是完成能量的转换，对它们的要求主要着重于**提高效率**等经济指标以及**起动和调速**等性能。

控制电机的主要任务是完成控制信号的传递和转换，因此，现代控制系统对它的基本要求是**高精度、高灵敏度和高可靠性**。

第 6 章 控制电机及其控制系统

控制电机的分类：

（1）一类用做**执行元件**。主要包括交直流伺服电动机、无刷直流电动机、步进电动机和直线电动机等。这些控制电机的任务就是将输入的电信号转换为转子的角位移或角速度，或者动子的线位移或线速度，并带动控制对象运动，所以又称为**功率元件**。

（2）一类用做**测量元件**。主要包括旋转变压器、自整角机和交直流测速发电机等。这些控制电机的任务就是测量自动控制系统中的角位移、转差角或转速，其输出一般为电压信号，可以驱动执行电动机完成矫正或测量任务，所以又称为**信号元件**。

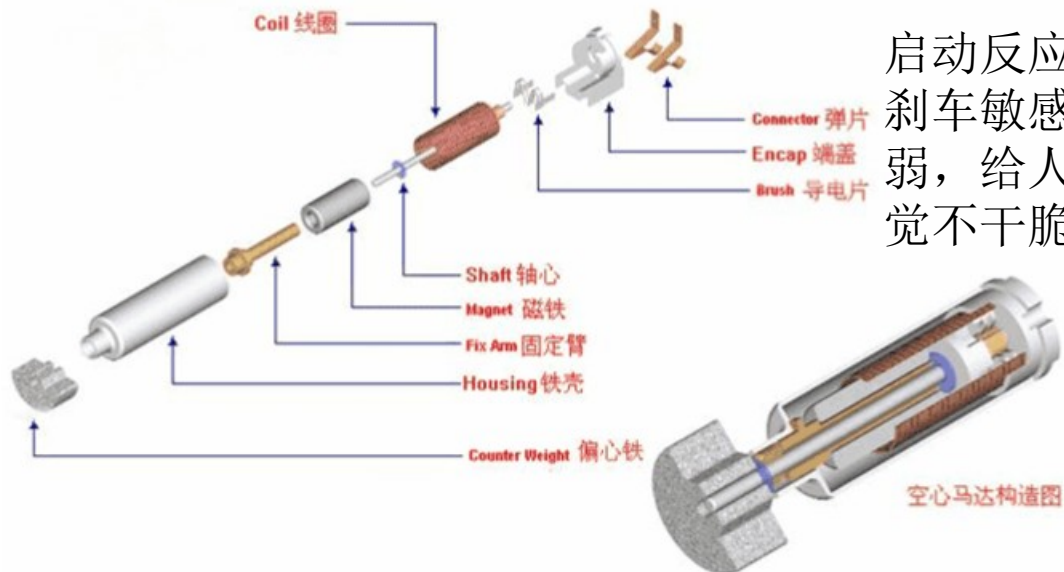
第 6 章 控制电机及其控制系统

本章重点：

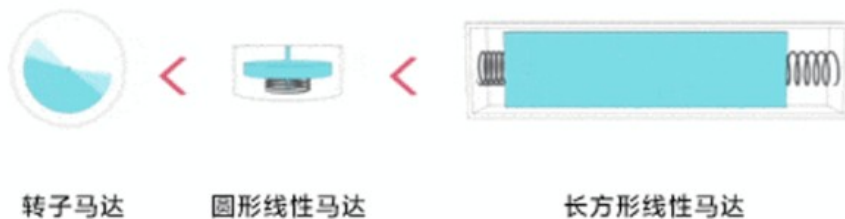
1. 伺服电动机的工作原理与基本结构
2. 旋转变压器的工作原理与基本结构
3. 自整角机的工作原理与基本结构
4. 步进电机的工作原理与基本结构
5. 步进电机的特性、驱动电源和控制方法

应用例：手机马达

常规直流电机



启动反应慢和
刹车敏感程度
弱，给人的感
觉不干脆



案例：国产超声电机诞生记

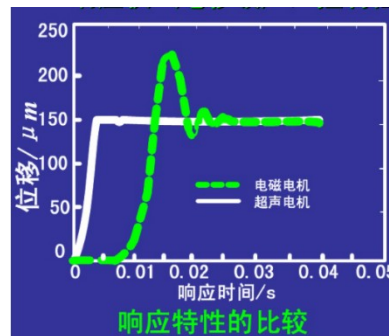
传统电机	↔	电磁效应
超声电机	↔	逆压电效应+超声振动

赵淳生，1938年11月出生。两岁父亲牺牲，九岁母亲病逝。在党的关怀下，他离开牛群进了学堂。10岁时他立下誓言，要用一辈子报答党的恩情。



1962年底，刚满24岁的赵淳生仅凭手绘的图纸，便成功研制出了在振动实验中必不可少的仪器——电动激振器，打破了该仪器的国外技术垄断。

1992年，赵淳生在海外访学第一次了解到超声电机时。不顾国外待遇，带着五大包资料和元器件，毅然回国开始超声电机研究。没经费、没场地，一切从“零”开始，但他像着了迷一样夜以继日，废寝忘食的研究。超人的毅力和顽强的斗志，不仅击败了病魔，还成功研制出60多种超声电机。



超声电机分辨率: 0.79"
伺服电机分辨率: 9.89"
步进电机分辨率: 25.5"

主持完成的“新型超声电机技术”，2003年获国防科技一等奖，2004年获国家技术发明二等奖。2005年67岁的赵淳生当选为中国科学院院士。RUM-30A超声电机，自重控制在46克，仅为传统电机重量的十分之一。成功应用于“嫦娥三号、四号探测器”，以及多种卫星、智能炮弹等高端装备上，打破了国外在超声电机领域的技术垄断，填补了国内空白。

“推进科技成果产业化，成为他眼下最大的心愿；努力奋斗，用行动爱国，就是我的信仰”。

控制电机的重要性

分成伺服电机、步进电机、力矩电机、开关磁阻、直流无刷等

伺服电机将输入电压信号转换为电机轴上的机械输出量。一般地具有线性度很好的机械特性和调节特性外，还必须具有**伺服性**：**即控制信号电压强时，电动机转速高；控制信号电压弱时，电动机转速低；若控制信号电压等于零，则电动机不转。**

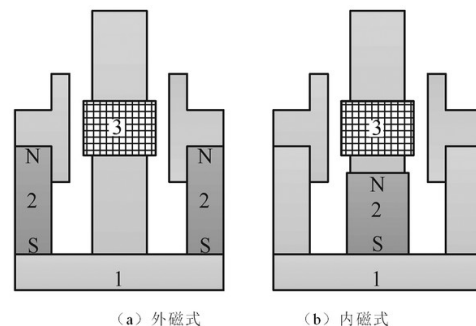
步进电机是将电脉冲转化为角位移的执行机构。通过控制脉冲个数来控制电机位移量；通过脉冲频率控制电机速度和加速度。控制精度、速度范围、低速性能方面不如传统闭环控制直流伺服电机。

力矩电机是一种扁平型多极永磁直流电机，极数槽数换向片数串联导体数多，输出转矩大且脉动小，可在接近堵转状态下直接带载低速运行。交流力矩电机常用的是鼠笼型异步力矩电机，具有低转速和大力矩等特点。

开关磁阻电机是一种新型调速电机，结构极其简单且坚固，成本低，调速性能优异。存在转矩脉动、运行噪声和振动大等问题

无刷直流电机又分为无刷速率电机和无刷力矩电机。为了减少转动惯量，通常采用“细长”结构。在重量和体积上要比有刷直流电机小的多，相应的转动惯量可以减少 **40%—50%** 左右。机械特性和调节线性度好，调速范围广、噪声小。

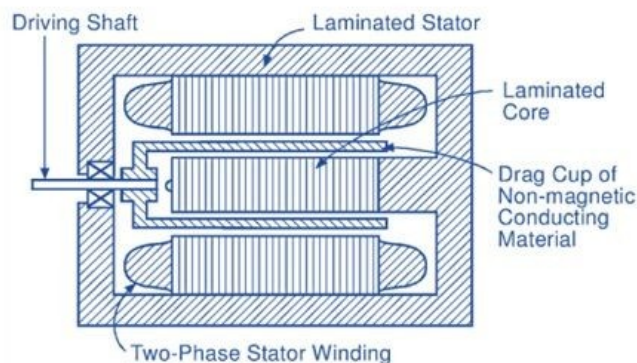
音圈电机依靠音圈使得内部的配重块上下抖动，制造高频震动，类似耳机的音圈。启动速度快。
VCM 自动对焦马达。



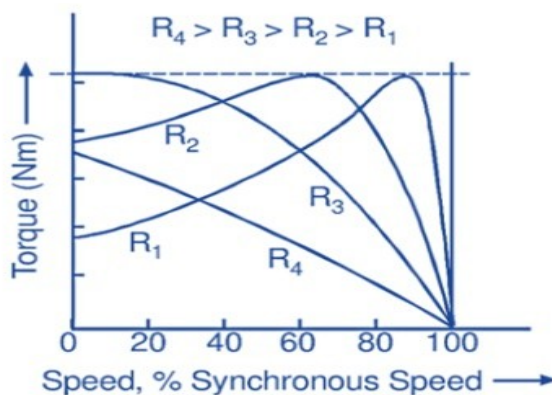
6.1 伺服电动机

6.1.1 交流伺服电动机

交流伺服电动机是一种**交流异步电动机**，在结构上与一般异步电动机相似，但它有着**接近于直线的转速—转矩曲线和良好的控制性能**，它有着较长的发展历史，应用广泛。



带有拖杯式转子的两相伺服电机的横截面 知乎 @哆啦A梦

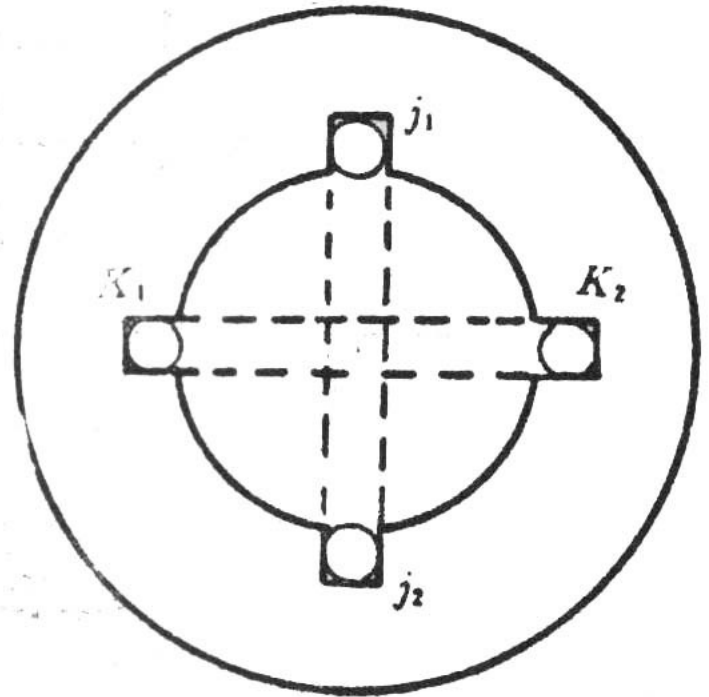


两个绕组（励磁绕组与控制绕组）在空间中分别以 90° 电气角缠绕；
控制绕组由伺服放大器可变控制电压供电；

1. 结构特点

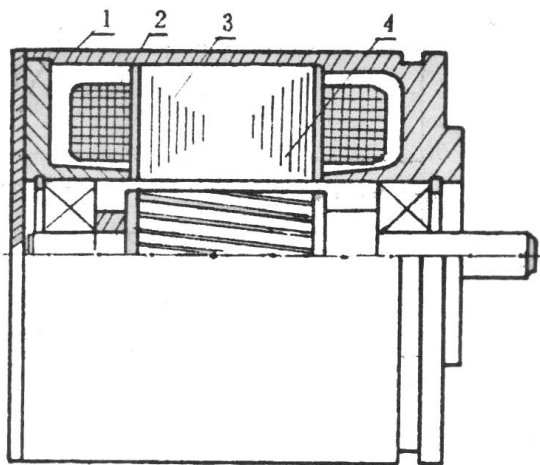
(1) 定子

在定子的铁芯中，相隔 90 度电角度放置两相交流绕组，如图所示。其中， j_1 — j_2 称为励磁绕组， k_1 — k_2 称为控制绕组，所以交流伺服电动机也称为两相伺服电动机。



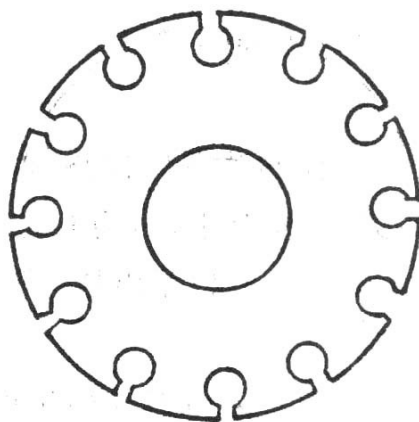
(2) 转子：常用的有两种，即鼠笼式转子和非磁性杯形转子。

①鼠笼式转子：去掉铁芯后的转子绕组形状似鼠笼，所以称这种结构为鼠笼式转子。

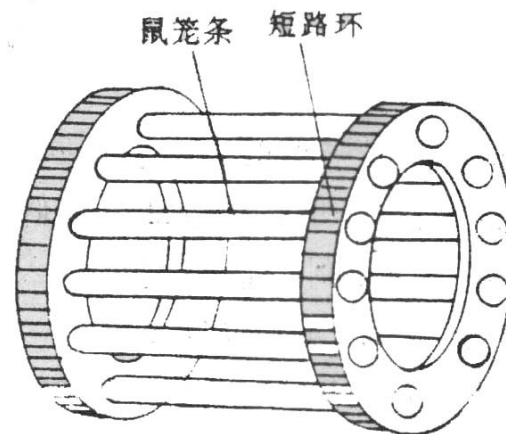


(a) 鼠笼转子伺服电动机结构

1 — 机壳；2 — 定子绕组；3 — 定子铁芯；4 — 鼠笼转子

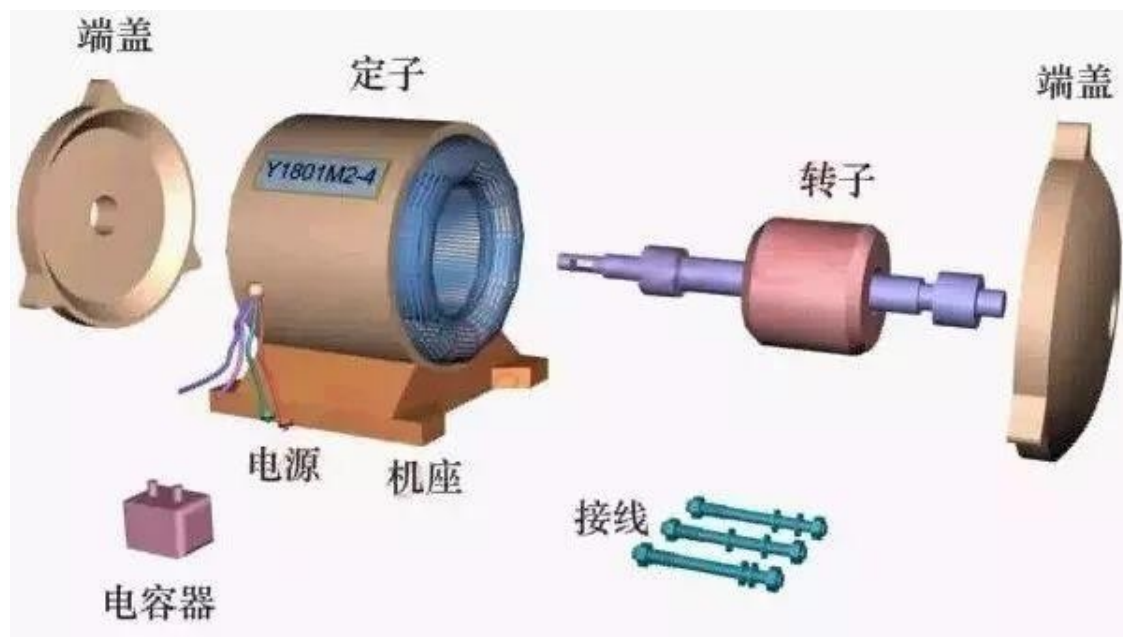


(b) 转子冲片



(c) 鼠笼

② 非磁性空心杯转子：非磁性导电材料（如铝）制成。
杯壁薄而轻 (0.2-0.8mm)、惯量小，响应快。



杯型转子交流伺服电动机

外定子，杯形转子和内定子三部分。外定子和笼型交流伺服电机相同，转子则由非磁性导电材料（如铜或铝）制成空心杯形状。内定子由硅钢片叠压而成，固定在一个端盖上，内定子上没有绕组，仅作磁路用。

③ 两者的比较

杯型转子可以看成是条数非常多、条与条彼此靠在一起的鼠笼转子，所以它只是鼠笼转子的一种特殊形式。转子**惯量小**，轴承摩擦转矩小，定转子之间没有齿槽啮合现象，运转平稳。但转子出力小，且结构和制造工艺复杂，仅在要求运转非常平稳的特殊场合下才使用。转子**阻值大**是公共的特点。

鼠笼式电机结构简单，可靠性好，生产方便。但是它的惯量大，在低速运行时会有抖动现象。

2. 工作原理

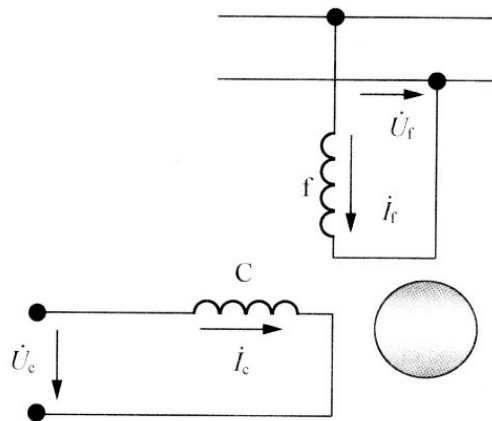


图 6.6 交流伺服电动机的原理图

在空间上差 **90 度电角度**、**匝数相同**的两个绕组称为两相对称绕组。

相位彼此相差 90 度，**幅值彼此相等**的两个电流称为两相对称电流。

在两相对称绕组中通入两相对称电流，这时，在电机内将产生一个圆形旋转磁场。

❖ 两相对称电流：幅值相等，相位相差 90° 。

$$i_c = I_m \sin \omega t$$

$$i_f = I_m \sin(\omega t - 90^\circ)$$

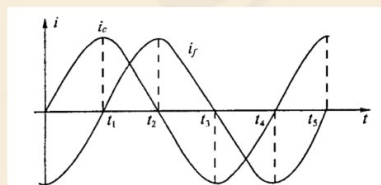
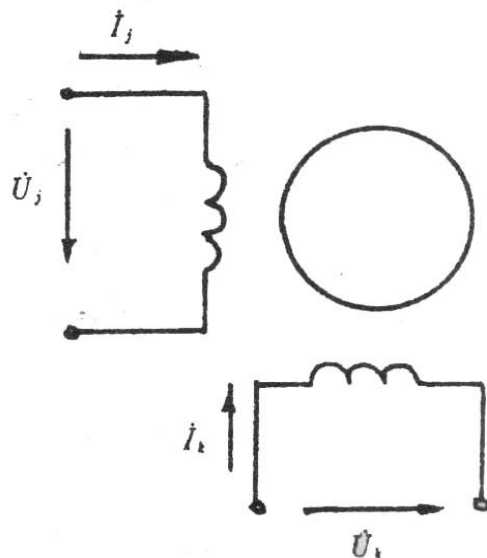


图 3-6 两相对称电流

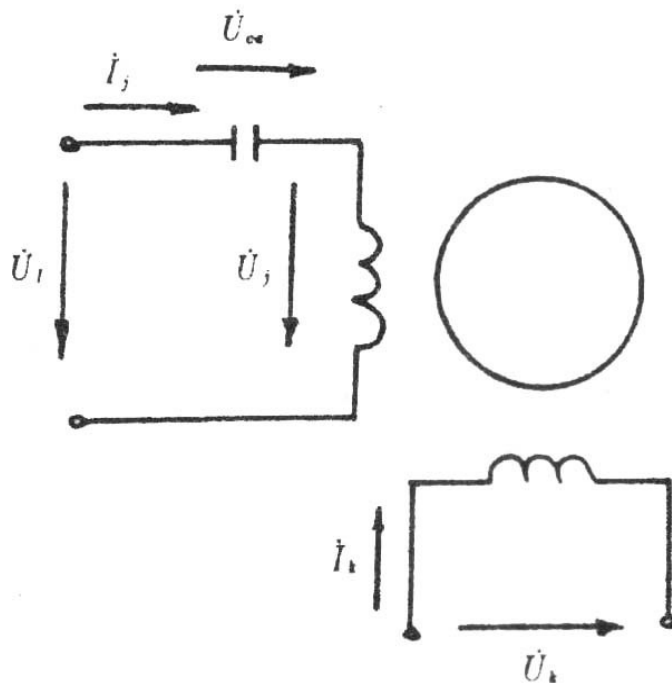
3、 转速控制方式

（1）幅值控制：通过调节控制电压改变电机转速，而控制电压与励磁电压之间的相位差保持 90° 。

（2）相位控制：通过调节控制电压与励磁电压的相位差来改变转速。幅值保持不变，**需要复杂移相装置**，故较少采用。



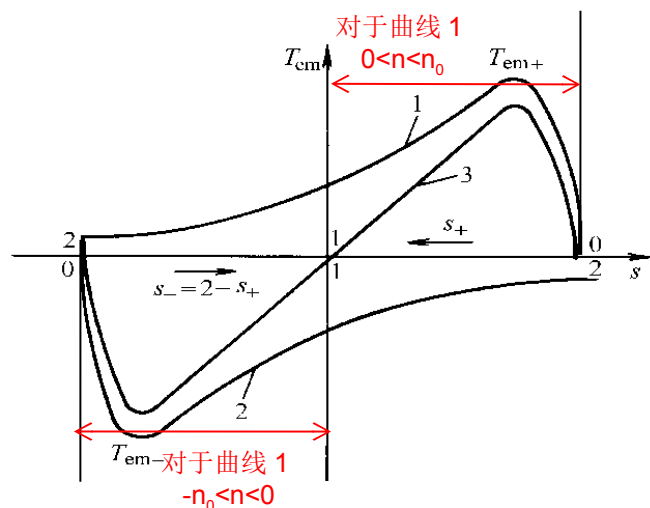
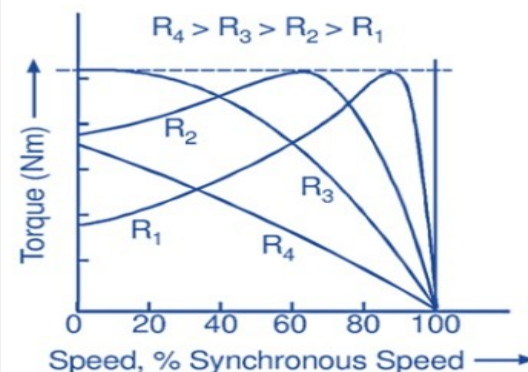
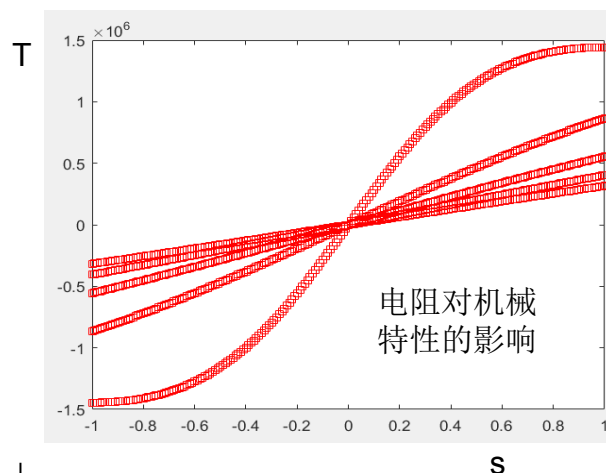
(3) 幅值—相位控制（或称电容控制）：励磁绕组串联电容并接电源，控制绕组加上与此电源相位相同的控制电压。当调节控制电压时，由于耦合作用，励磁绕组电流相应发生变化，使得控制电压和励磁电压的大小及相位差也都变化，故它是一种幅值和相位复合控制方式。由于**利用串联电容器来分相**，无需复杂移相装置，是最常用的控制方式。



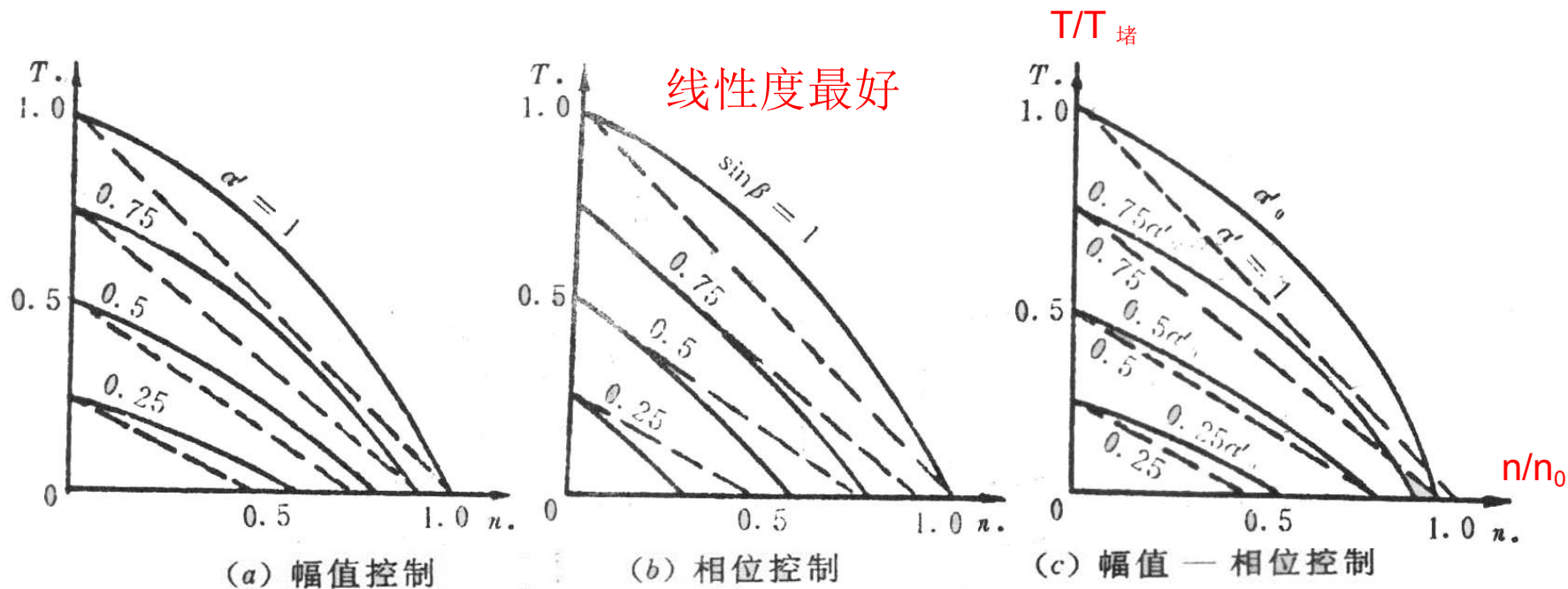
4. 主要工作特性

(1) 机械特性：当控制电压不变时，电机的转速随着转矩而变化的关系。

$$T = K \frac{s R_2 U_1^2}{R_2^2 + (s X_{20})^2}$$



转子电阻大，使得临界转差率可以 >1 ，为电机控制提供条件。



$a = U_c/U$ 为信号系数，当 $a=0$ 时，定子只有脉动磁场；当 a 为 1 时，产生圆形旋转磁场，对称运行状态；当 $0 < a < 1$ 时，椭圆形磁场，电机运行不对称度随 a 的增大而减小。

几点说明：

①横坐标为转速的相对值

②转差率：
$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

③纵坐标为电磁转矩和堵转转矩之比

④理想空载转速：是指电磁转矩为零的条件下的转速。

⑤空载转速：空载下的转速（ $T_L = 0$ ）。

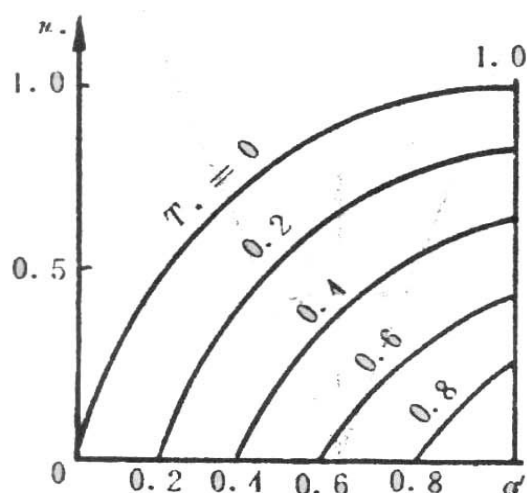
⑥“理想电机”的特性：图中的虚线。

⑦线性度：线性度最好的为相位控制，其次为幅值控制，最差的是幅值相位控制，但是它的控制方式实现起来最简单。

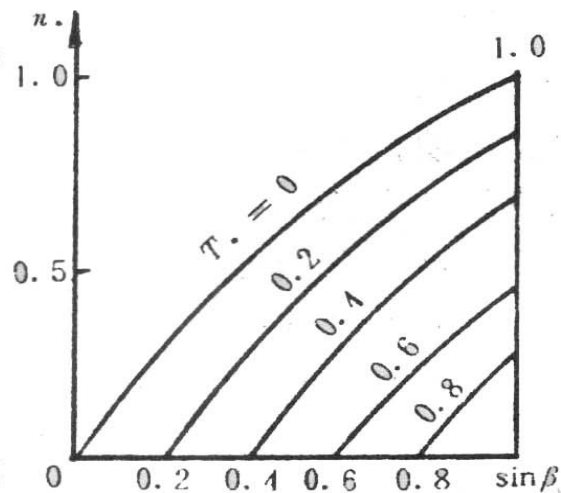
The diagram illustrates the relationship between ideal and actual no-load speeds. It features a vertical axis and a horizontal axis. A horizontal dashed line represents the ideal no-load speed, labeled '理想空载转速' (Ideal no-load speed) with the formula $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$. A solid line below it represents the actual no-load speed, labeled '电动机实际空载转速' (Actual no-load speed of the motor) with the formula $n'_0 = n_0 - \frac{R}{C_e C_T \Phi^2} T_0$. The vertical distance between the two lines represents the speed drop due to armature resistance.

(2) 调节特性

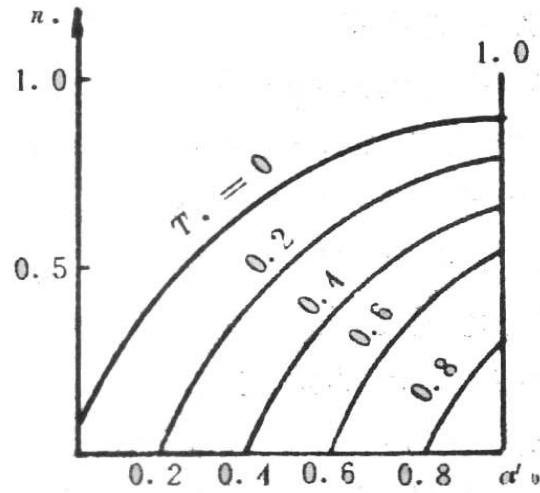
指电磁转矩不变时，转速随控制电压而变化的关系。它也不是线性的，只在转速相对值较小和信号系数不大的范围内才近于线性关系，同时，**相位控制时的线性度最好。**



(a) 幅值控制



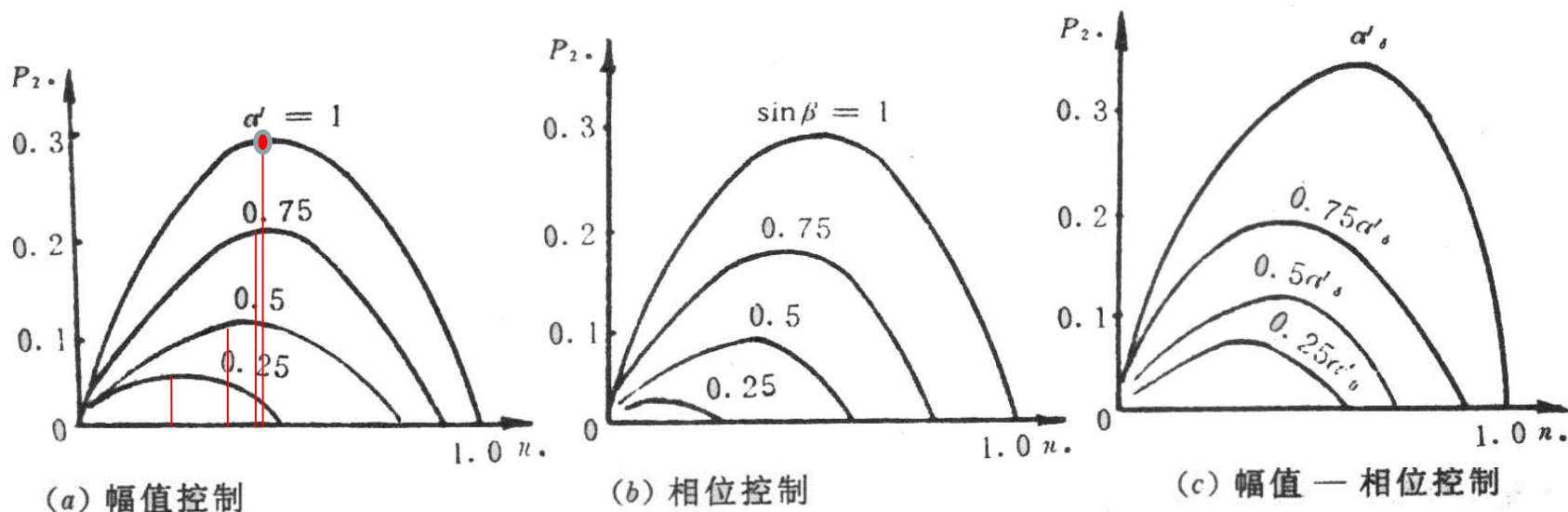
(b) 相位控制



(c) 幅值—相位控制

(3) 输出特性：是指在一定的控制电压下，电机的输出机械功率与转速之间的关系。

- ① 最大功率点：出现在理想空载转速的 0.55 倍左右处；控制电压越小，最大输出机械功率减小，且出现该值时的转速越低。
- ② 额定功率和额定转速：额定信号系数（有效信号系数为 1）时的最大输出机械功率为电机的额定功率，对应转速称为电机的额定转速。



（4）三种控制方式比较

相同信号系数下，幅值相位控制时最大输出机械功率值较大，而相位控制时较小。虽机械特性线性度差，但应用最为常见。

（5）单相运行不“自转”问题

当控制信号消失时，电动机将处于只有励磁电压的单相运行情况，此时它应有自制动能力，不允许出现“自转”。

设计时常采用增大转子电阻的方法，阻值选择视具体情况而定。“自转”问题，一般是由于转子的参数设计不合理如转子电阻小，而电源内阻大，或制造工艺缺陷情况下发生。

(6) 动态特性

①影响因素：电机本身的结构和参数，使用条件，如控制方式、驱动电源的阻抗和控制电压波形等。

②基本方程式

假设：电源输出阻抗为零，幅值控制

电压方程式：
$$u_k(t) = i_k(t)R + L \frac{di_k(t)}{dt}$$

电磁力矩：
$$M = K_i i_k(t)$$

转矩平衡方程式：
$$J \frac{d\omega(t)}{dt} + K_D \omega(t) + M_f = M$$

③ 传递函数:

$$\left. \frac{\Omega(s)}{u_k(s)} \right|_{M_f=0} = \frac{K_M}{(T_M s + 1)(T_E s + 1)}$$

式中:

力矩系数: $K_M = \frac{K_i}{K_D R}$

机械时间常数: $T_M = \frac{J}{K_D}$

电气时间常数: $T_E = \frac{L}{R}$

如何缩短机电
时间常数?

6.1.2 直流伺服电动机

1. 结构和分类

传统式和低惯量式两种

(1) 传统式：定子与转子两部分组成。

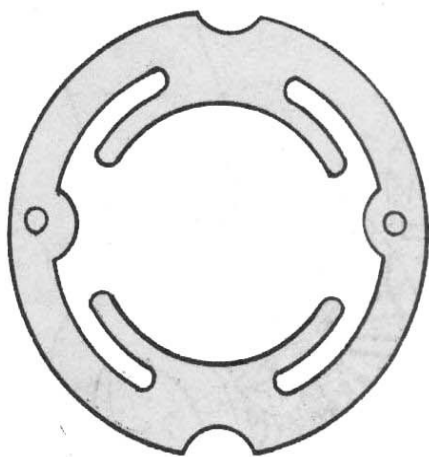


图 2-2 电磁式直流伺服电动机的定子冲片

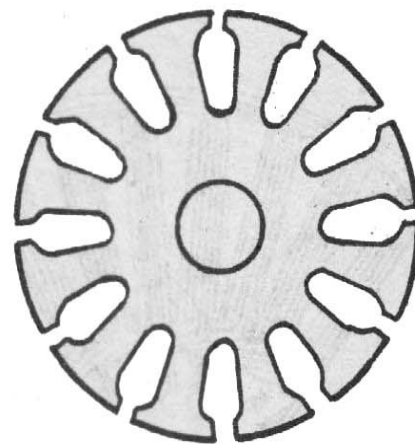
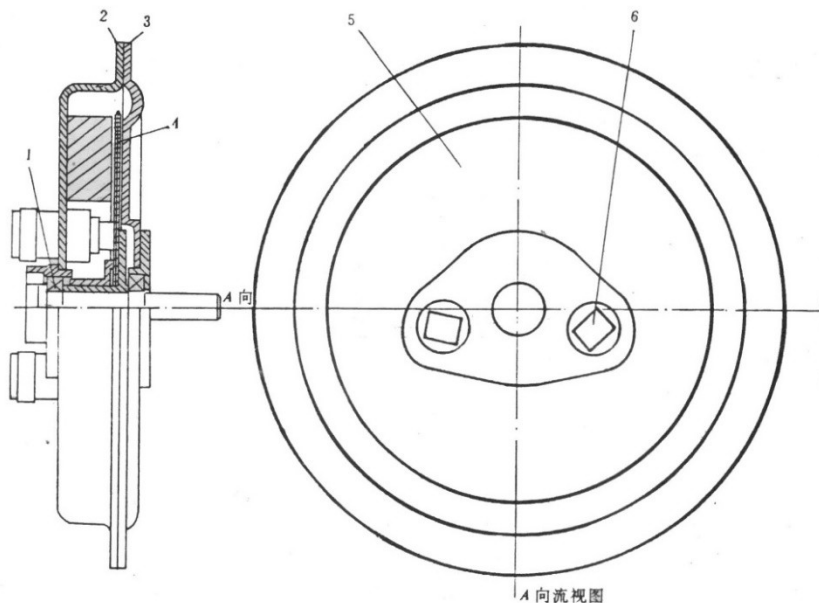
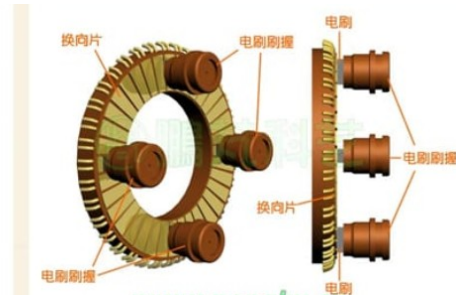
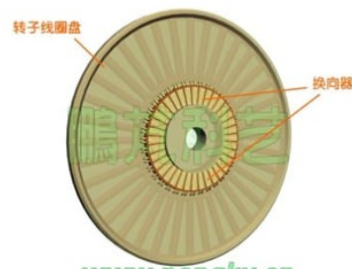


图 2-3 直流伺服电动机的转子冲片

(2) 低惯量式结构

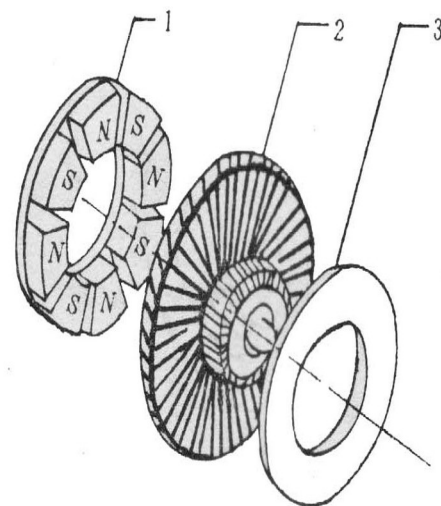
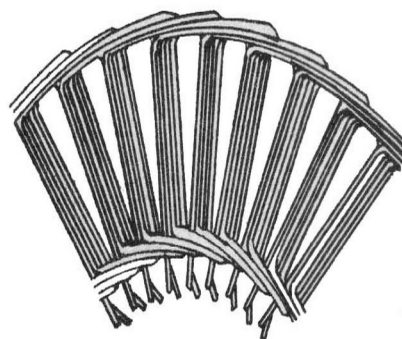
降低转子转动惯量，提高响应速度。

① 盘形电枢直流伺服电机



盘形印制绕组电枢直流电动机结构

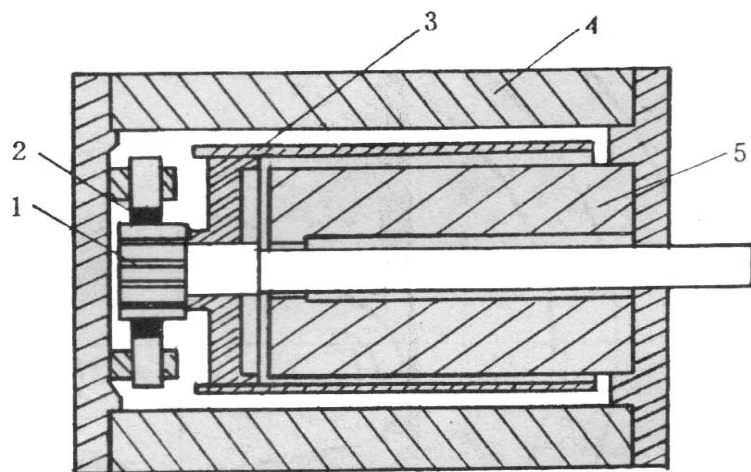
1—轴承；2—导磁端盖；3—导磁外壳；4—印制绕组；5—多极磁钢；6—电刷



绕线盘形电动机的主要零部件图

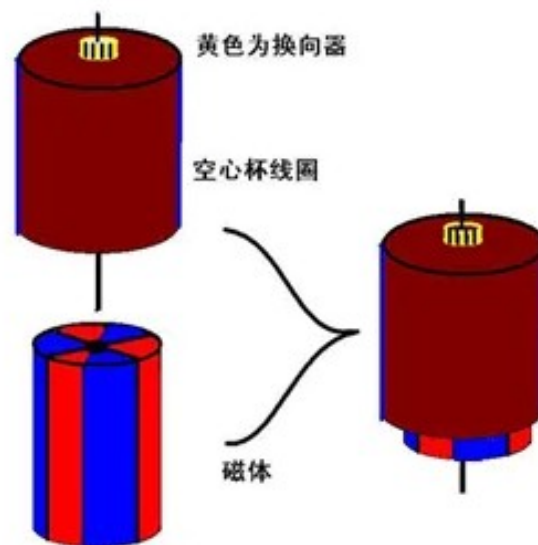
1—磁钢；2—盘形电枢；3—铁芯

② 空心杯电枢直流伺服电机 内外双定子或内定子。

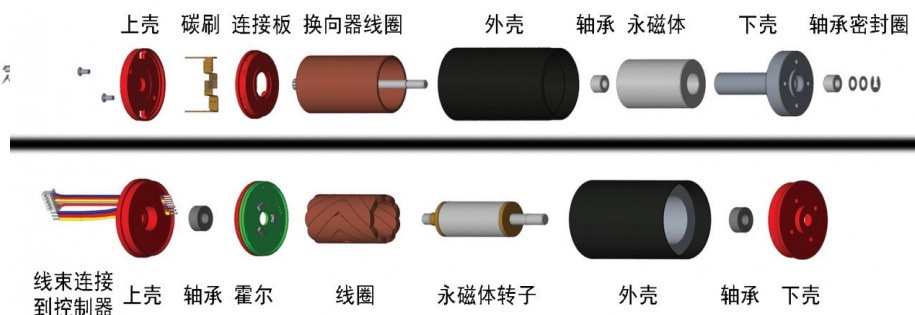


空心杯电枢永磁式直流电动机结构简图

1 — 换向器; 2 — 电刷; 3 — 空心杯电枢; 4 — 外定子; 5 — 内定子

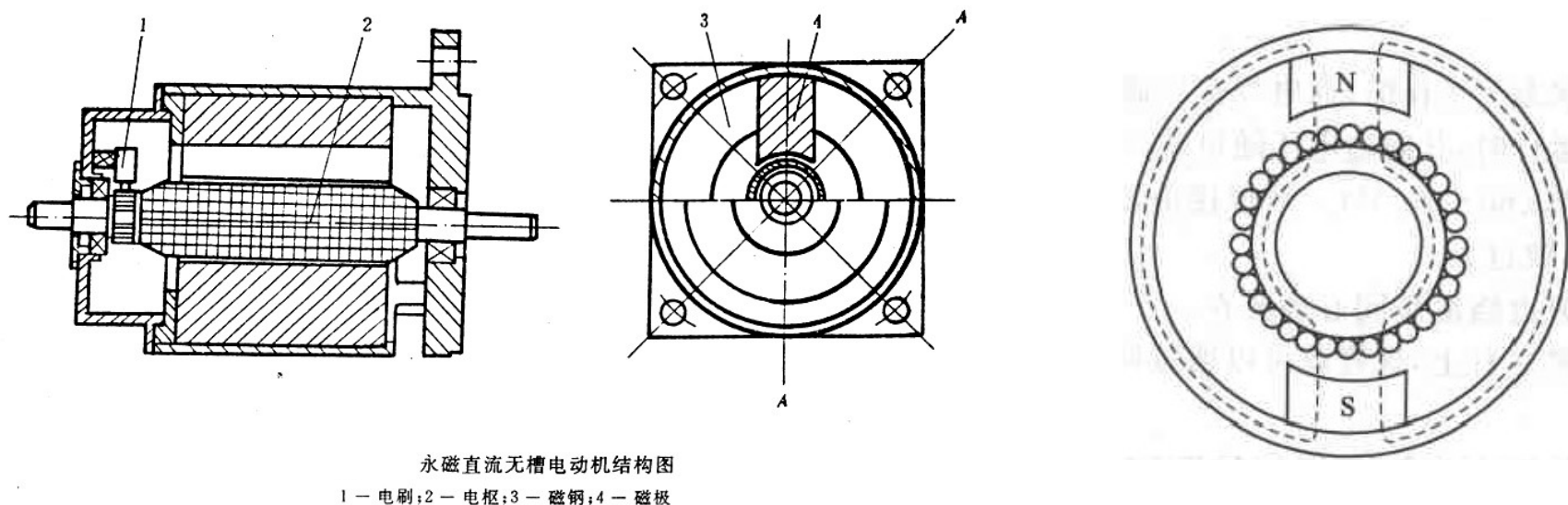


直流有刷空心杯电机爆炸图



直流无刷空心杯电机爆炸图

③ 无槽电枢直流伺服电动机



电枢铁芯上不开槽，电枢绕组直接排列在铁芯表面，用环氧树脂把它与电枢铁芯粘成一个整体其，定子磁极可以用永久磁铁，也可采用电磁式。转动惯量和电枢绕组电感比较大，其动态性能不如盘行电机和空心杯电机。

2. 控制方式

使用直流伺服电动机的目的是将它用于控制系统，对于直流伺服电动机而言，当励磁电压恒定（对他励式而言），负载转矩一定时，**电机的转速随着电枢电压的大小而变化，方向随着电枢电压的极性而变化**，因此，将电枢电压作为控制信号，就可以对电动机的转速进行控制。这种控制方式称为**电枢控制式**，电枢绕组称为**控制绕组**。

3. 静态工作特性

(1) 直流伺服电动机的静态方程

假设：①电机的磁路为不饱和；②略去带载时电枢反应磁势的影响；

电压平衡方程式为： $U_a = E_a + i_a R_a$

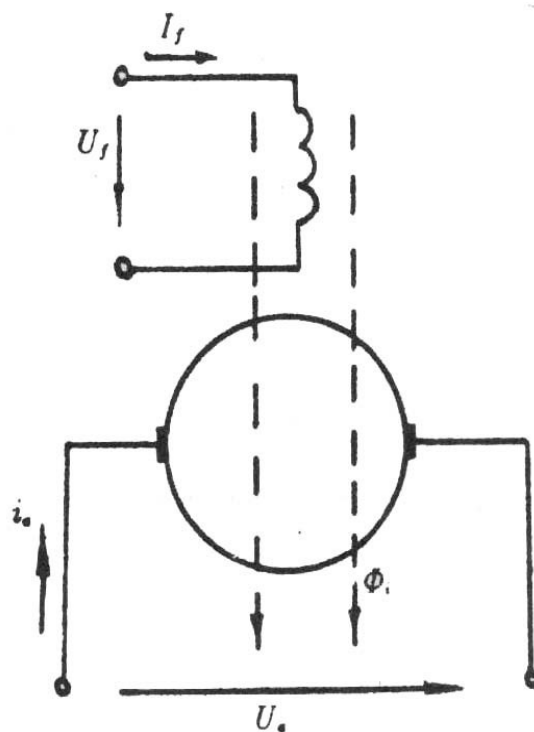
感应电势为： $E_a = C_e \Phi n = K_e n$

电动机的电磁转矩为： $T_{em} = C_t \Phi i_a = K_t i_a$

将以上三式联立，可得直流伺服电动机的转速公式为：

$$n = \frac{U_a}{K_e} - \frac{R_a}{K_t K_e} T_{em}$$

国际单位制下： $K_t = K_e$



电枢控制时直流伺服电动机的工作原理图

(2) 机械特性

机械特性是指**控制电压恒定时**，
电机的**转速随转矩变化的关系**。

特点：

① 线性，一组平行直线。

② 理想空载转速： $n_0 = \frac{U_a}{K_e}$

③ 堵转矩 T_d ：
 $T_d = \frac{K_t}{R_a} U_a$

④ 硬度：机械特性曲线的斜率的绝对值。

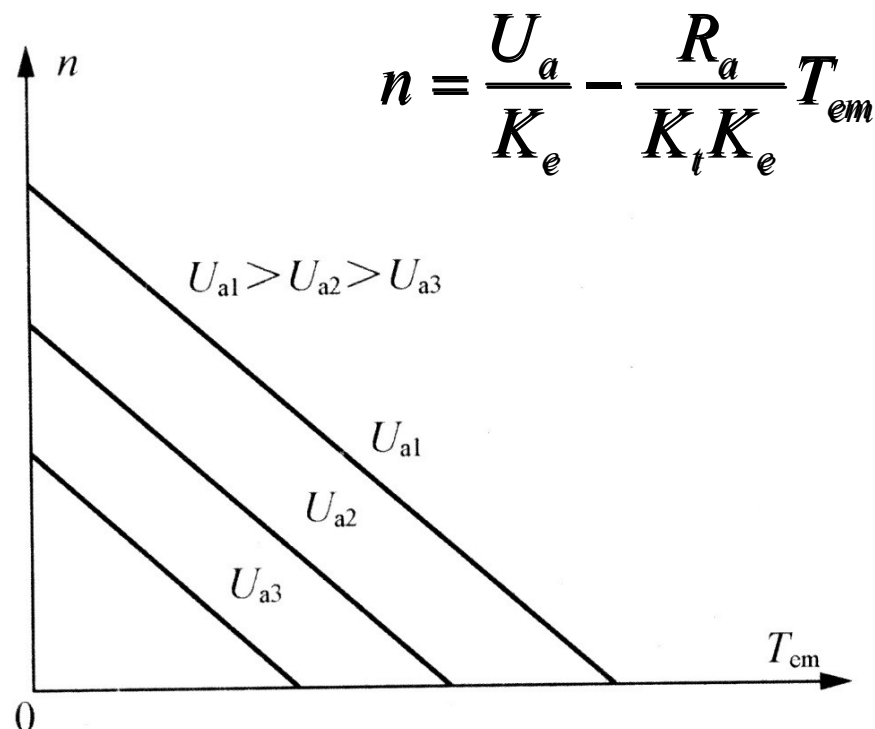


图 6.12 电枢控制直流伺服
电动机的机械特性

(3) 调节特性

调节特性是指转矩恒定时，电机的转速随控制电压变化的关系。

① 始动电压

② 失灵区

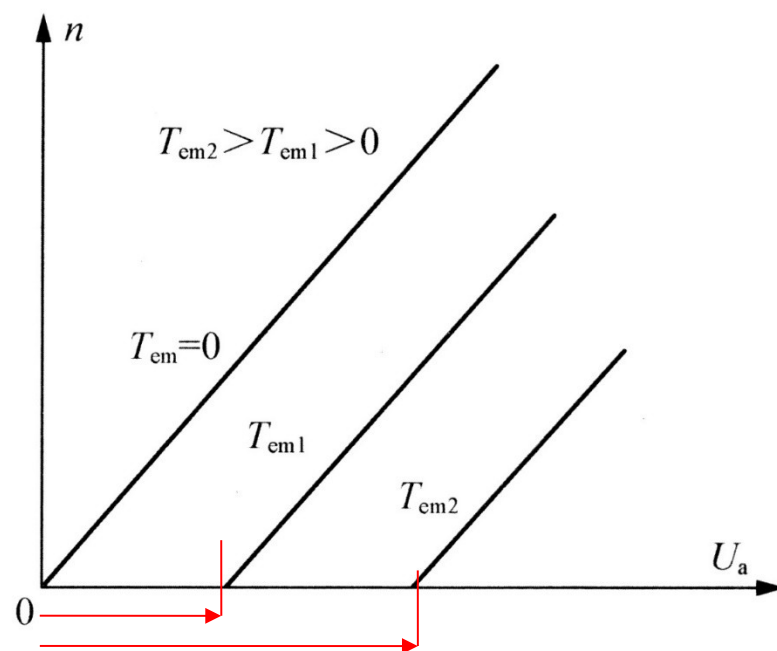


图 6.13 电枢控制直流伺服电动机的调节特性

$$n = \frac{U_a}{K_e} - \frac{R_a}{K_t K_e} T_{em}$$

例 6-2 已知一台直流伺服电动机的电枢电压 $U_a = 110\text{V}$ ，空载电流 $I_{a0} = 0.055\text{A}$ ，空载转速 $n'_0 = 4600\text{r/min}$ ，电枢电阻 $R_a = 80\Omega$ 。试求：

(1) 当电枢电压 $U_a = 67.5\text{V}$ 时的理想空载转速 n_0 及堵转转矩 T_d 。

(2) 该电动机若用放大器控制，放大器内阻 $R_i = 80\Omega$ ，开路电压 $U_i = 67.5\text{V}$ ，求这时的理想空载转速 n_0 及堵转转矩 T_d 。

(3) 当阻转矩 $T_L + T_0$ 由 $30 \times 10^{-3}\text{N} \cdot \text{m}$ 增至 $40 \times 10^{-3}\text{N} \cdot \text{m}$ 时，试求上述两种情况下转速的变化 Δn 。

解： (1)
$$n = \frac{U_a}{K_e} - \frac{R_a}{K_e K_t} T_g = \frac{U_a}{K_e} - \frac{R_a}{K_e K_t} K_t I_a = \frac{U_a - R_a I_a}{K_e}$$

$$K_e = \frac{U_a - R_a I_a}{n} = \frac{110 - 80 \times 0.055}{4600 \times 2\pi / 60} = 0.219 \text{ V} \cdot \text{s}$$

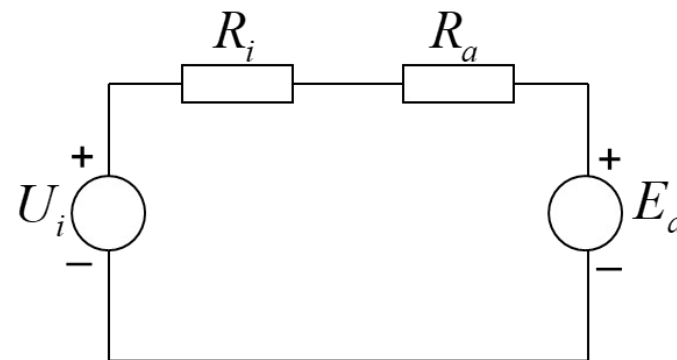
理想空载转速：
$$n_0 = \frac{U_a}{K_e} = \frac{67.5}{0.219} = 308.2 \text{ rad/s} = 2940 \text{ rpm}$$

堵转转矩：
$$T_d = K_t I_d = K_t \frac{U_a}{R_a} = 0.219 \times \frac{67.5}{80} = 0.185 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(2) 有内阻的放大器控制电路原理图

在理想空载时，有 $I_a = 0$ ，则理想空载转速为：

$$n_0 = \frac{U_a}{K_e} = \frac{67.5}{0.219} = 308.2 \text{ rad/s} \approx 2940 \text{ rpm}$$



在堵转时有 $E_a = 0$ ，则其堵转转矩为：

$$T_d = K_t I_d = K_t \frac{U_a}{R_a + R_i} = 0.219 \times \frac{67.5}{80 + 80} = 0.0924 \text{ N} \cdot \text{m}$$

(3) 由转速公式: $n = \frac{U_a - R_a I_a}{K_e}$

可得: $\Delta n = -\frac{R_a \Delta I_a}{K_e}$

由转矩公式: $T_{em} = K_t I_a$

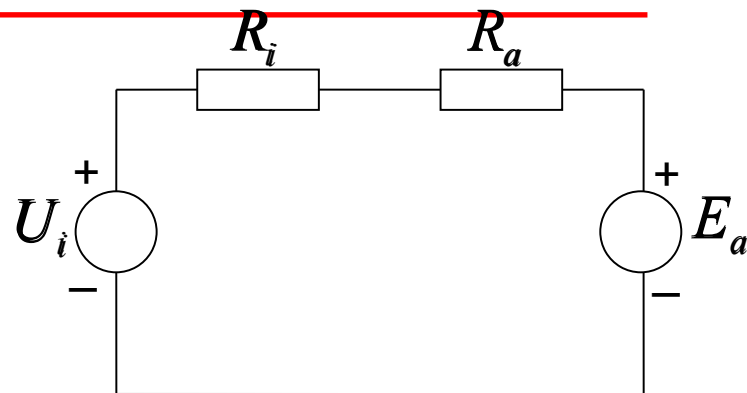
可得: $\Delta I_a = \frac{\Delta T_{em}}{K_t} = \frac{0.01}{0.219} = 0.0457 \text{ A}$

则直接供电时:

$$\Delta n = -\frac{R_a \Delta I_a}{K_e} = -\frac{80 \times 0.0457}{0.219} = -16.7 \text{ rad/s} = -159 \text{ rpm}$$

放大器供电时:

$$\Delta n = -\frac{(R_a + R_i) \Delta I_a}{K_e} = -\frac{160 \times 0.0457}{0.219} = -318.6 \text{ rpm}$$



4. 动态特性

(1) 定义

电枢控制时直流伺服电动机的动态特性，是指在电动机的电枢上外加阶跃电压时，电机的转速增长过程。

对直流伺服电动机的过渡过程要求越短越好，使得电动机的转速变化能够迅速跟上控制信号的变化。在它的动态特性中，是由两个过渡过程交叠在一起的。

首先是电枢绕组由于电感作用，电流不能突然增长，有一个电气过渡过程，相应的电磁转矩增长也有一个过渡过程。

由于电枢有转动惯量，转速也不能突然增长，是一个机械过渡过程。

我们可以理解为由于机械和电气的惯性，电动机过渡过程是一个电气和机械过渡过程交叠的机电过渡过程。

(2) 基本方程式

① 电压方程式

$$U_i(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + E_g(t)$$

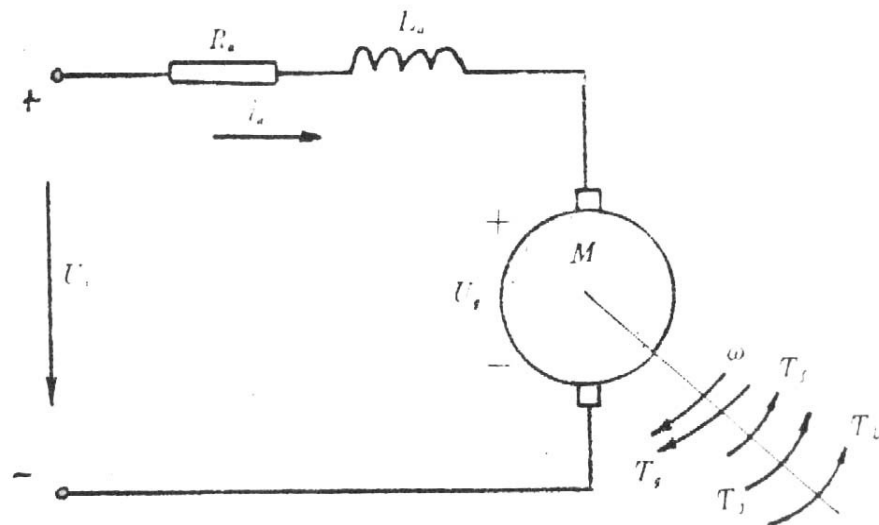
$$E_g(t) = K\Phi(t)\omega(t) = K_e\omega(t)$$

② 电磁转矩

$$T_g(t) = K_t i_a(t)$$

③ 转矩平衡方程式

$$T_g(t) = T_f(t) + T_L(t) + J \frac{d\omega(t)}{dt} + B\omega(t)$$



直流伺服电动机的等效电路图

④ 空载转矩：转子上的电磁功率一部分消耗于电动机中转子的风阻、机械磨擦和转子铁芯中在磁滞和涡流损耗，这一部分功率称为磨擦或空载损耗，亦称空载转矩。

⑤ 转子的机械功率

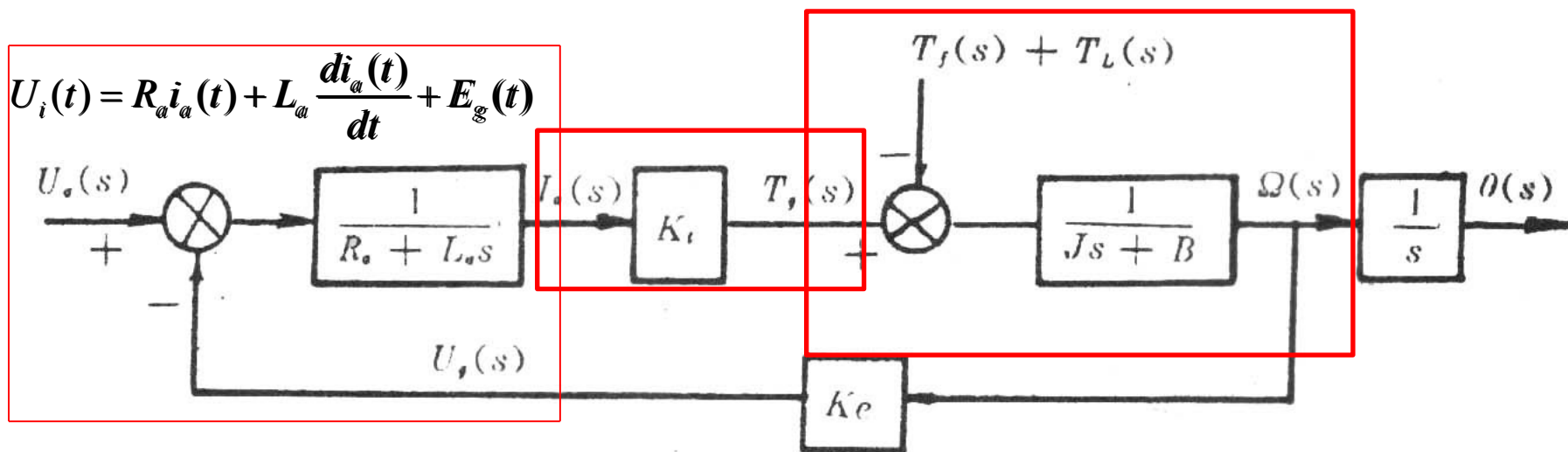
$$P_g(t) = T_g(t)\omega(t) = K_t i_a(t)\omega(t) \quad \text{忽略惯量、阻尼及摩擦等}$$

⑥ 转子的电功率

$$P_g(t) = E_g(t)i_a(t) = K_e i_a(t)\omega(t)$$

故： $K_e = K_t$

(3) 直流电动机的传递函数



速度输出为：

$$\Omega(s) = G_1(s)U_a(s) + G_2(s)[T_f(s) + T_L(s)]$$

其中， $G_1(s)$ 为电压 - 速度传递函数， $G_2(s)$ 为负载转矩 - 速度传递函数

$$G_1(s) = \frac{\Omega(s)}{U_a(s)} \Big|_{T_f(s)+T_L(s)=0} = \frac{K_t}{(L_a s + R_a)(J s + B) + K_t K_e} = \frac{K_m}{\alpha s^2 + \beta s + 1}$$

式中： K_m 为电动机常数

$$K_m = \frac{K_t}{R_a B + K_t K_e}, \alpha = \frac{L_a J}{R_a B + K_t K_e}, \beta = \frac{R_a J + L_a B}{R_a B + K_t K_e}$$

若令：电气时间常数 $\tau_e = L_a / R_a$ ，机械时间常数 $\tau_m = J / B$

$$G_1(s) = \frac{K_t}{R_a B (\tau_e s + 1) (\tau_m s + 1) + K_t K_e}$$

若电枢电感很小，则电气时间常数可以忽略不计，则有：

$$G_1(s) = \frac{K_m}{\tau s + 1} \quad \text{其中：} \tau = \frac{R_a J}{R_a B + K_t K_e}$$

$$G_2(s) = \frac{\Omega(s)}{T_f(s) + T_L(s)} \Big|_{U_a(s)=0} = \frac{-\frac{R_a}{K_t} K_m [\frac{L_a}{R_a} s + 1]}{\alpha s^2 + \beta s + 1}$$

略去电枢电感：

$$G_2(s) = \frac{-\frac{R_a}{K_t} K_m}{\tau s + 1}$$

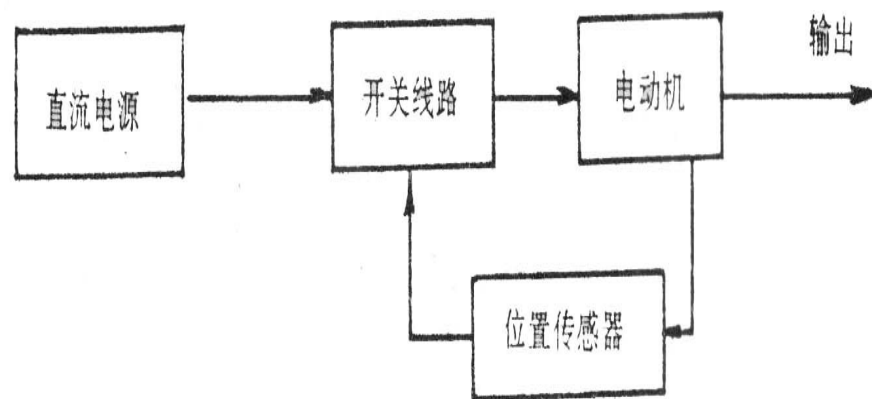
(4) 小结

- ① 系统为一个双端输入系统
- ② 对轴转速的输出是一个二阶系统，略去电枢电感后为一阶系统
- ③ 若以转角输出是一个 I 型系统，则对于转角的阶跃响应是无差的。

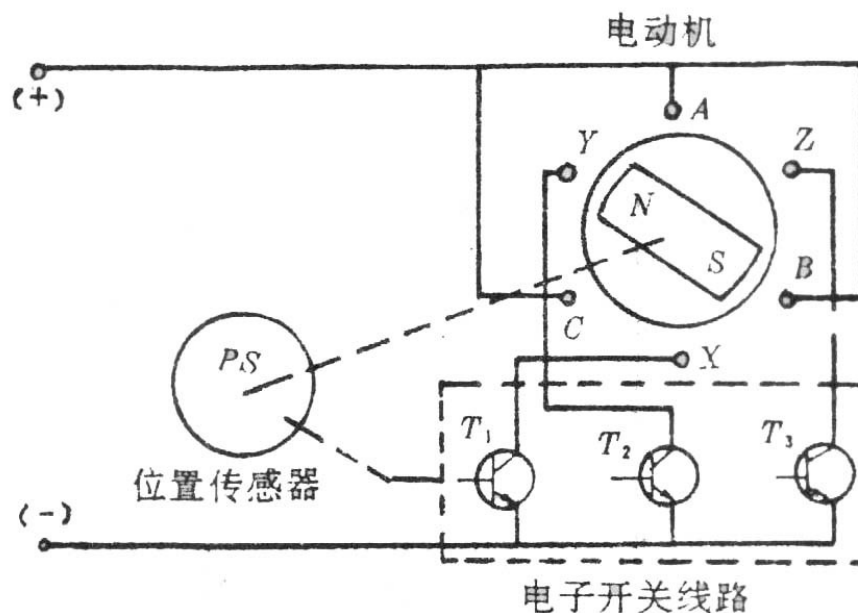
5. 其他型式直流伺服电动机

(1) 无刷直流伺服电动机

① 结构



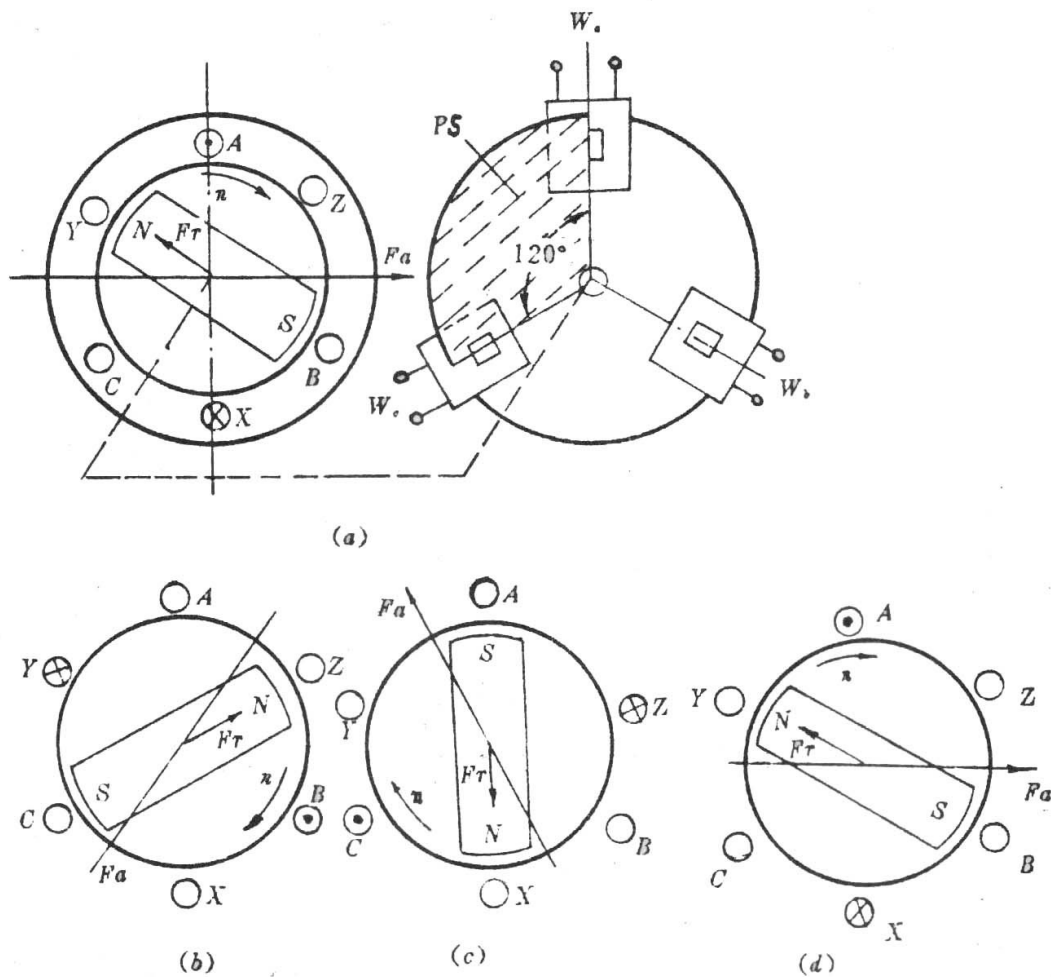
无刷直流电动机原理方框图



无刷直流电动机的结构简图

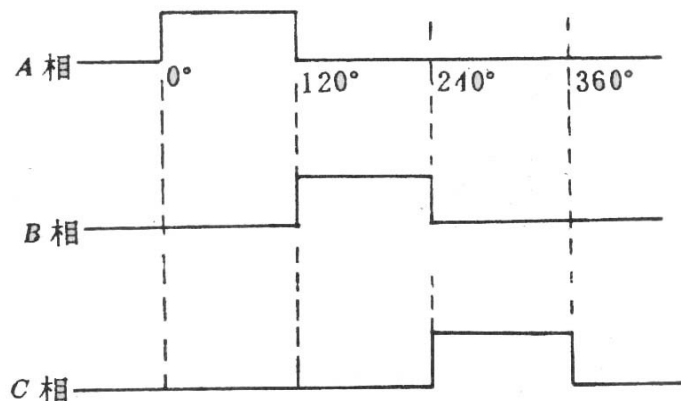
② 工作原理

- **转矩产生：**转子永磁体产生的磁势与电枢绕组磁势相互作用，使转子按一定方向旋转，同时晶体管开关电路依据转子位置传感器信号使不同电枢绕组通电，改变电枢绕组所产生的磁势，使得转子能连续不断地转动。



电枢磁势和转子磁势之间的相互关系

- 各绕组的通电状态:



三相非桥式电路的各相绕组电流波形

表 2-3

电角度	0°	$\frac{2\pi}{3}$	$\frac{4\pi}{3}$	2π
定子绕组的导通相	A	B	C	
导通的晶体管元件	T_1	T_2	T_3	

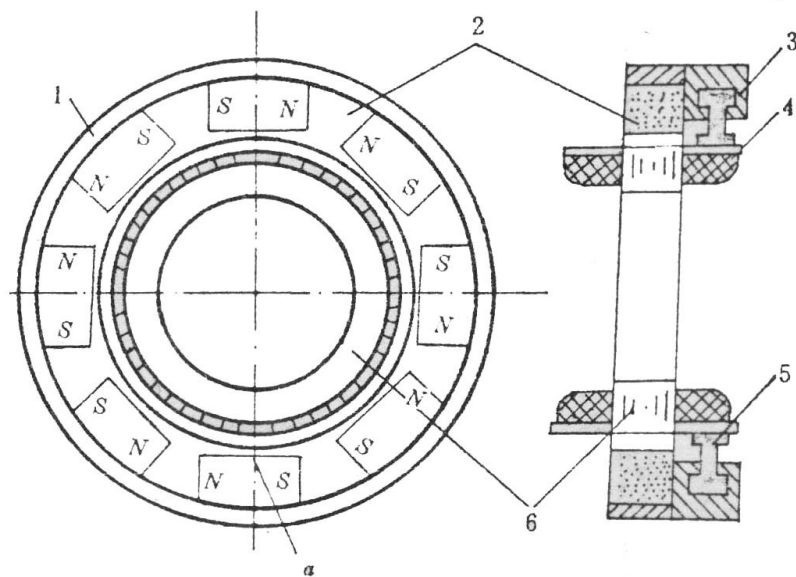
优缺点：具有直流电动机的机械特性和调节特性，又具有交流电动机的维护方便、运行可靠等优点。但是成本较高，总的体积亦较大。

(2) 直流力矩电动机 (自学)

伺服电动机和驱动电动机结合起来发展而成的特殊电机。它可以不经过齿轮等减速机构而直接驱动负载。**响应快，精度高，调速特性和机械特性的线性度好，可长期处于堵转状态，转速低，输出力矩大，具有良好的低速平稳性。**

① 结构特点：

大内孔盘式结构，可直接套于负载轴上，刚度高，频带宽。且便于安放多个磁极。



永磁式直流力矩电动机示意图

1 — 铜环; 2 — 定子; 3 — 电刷; 4 — 电枢绕组; 5 — 槽楔兼换向器片; 6 — 转子

② 运行性能分析

由于工作在低速直驱系统中，其力矩波动、调节特性的线性度、电气时间常数等问题就显得更加重要。

a) 力矩波动：指输出转矩的峰值与平均值之差，为表征力矩电动机性能优劣的一个重要的性能指标，影响力矩电动机低速平稳运行的重要因素之一。

产生原因：主要有换向、电枢齿槽等。

解决措施：

采用扁平式结构；适当减少电刷长度；尽可能增多槽数；采用磁性槽楔、斜槽用磁极桥等；并且正确地选择电枢的槽数，使它与电机的极对数之间无公约数。

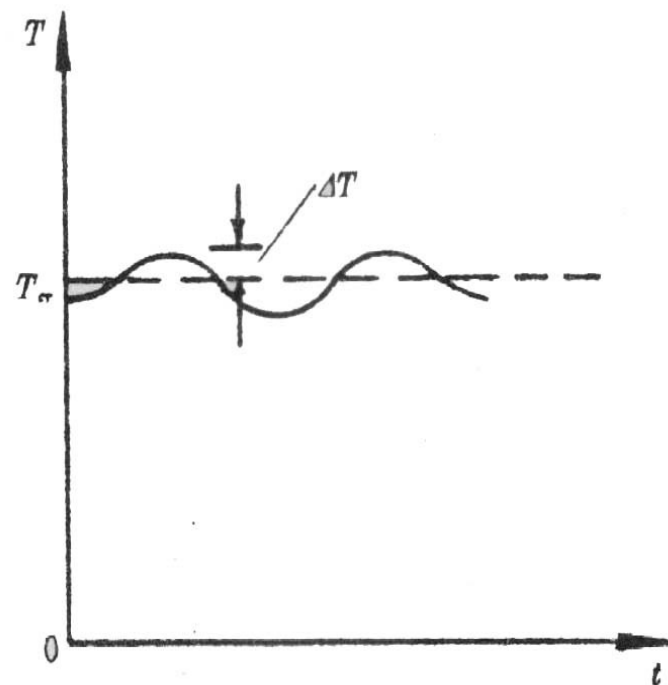


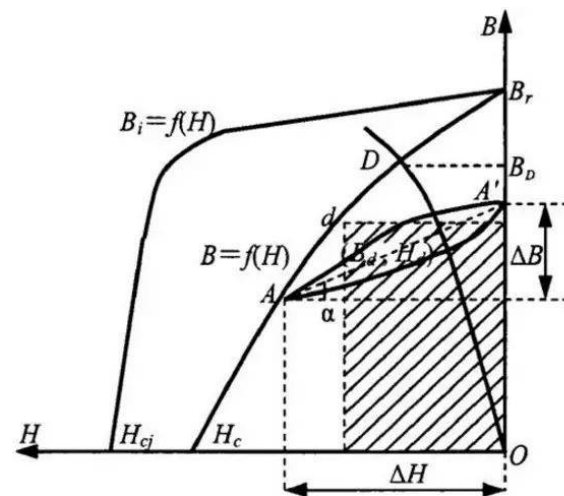
图 2-19 力矩的波动

b) 调节特性的线性度：尽量减小电枢反应的去磁作用，如磁路设计成高饱和状态，并选用磁导率小（回复线较平）的永磁材料做磁极，并且选取较大的间隙，从而使电枢反应的影响显著减小。

c) 电气时间常数：电枢电感直接影响电气时间常数大小。电感大小取决于电枢绕组的磁链：电枢反应磁链和漏磁链。

电枢反应磁链减小方法：增加极对数；加大气隙。

漏磁链减小方法：提高电枢铁芯的饱和程度。



(3) 电机的连续堵转转矩和峰值堵转转矩

- ① 连续堵转转矩：是指在长期堵转下，稳定温升不超过允许值时所能输出的最大堵转转矩。它主要由电机的温升所决定。对应于这种情况下的电枢电压称为连续堵转电压，相应的电枢电流称为连续堵转电流。它与电机的使用条件相关。（如散热面积的大小）。
- ② 峰值堵转转矩：
由电机的去磁作用所决定，超过峰值堵转转矩将使磁铁失磁而使电机性能产生不可逆变化。

6.1.3 交、直流伺服电动机的性能比较

- 1、机械特性和调节特性：直流伺服电机的两个特性均相互平行。而交流伺服电动机特性是非线性的，且互不平行。
- 2、体积、重量和效率：当功率相同时交流伺服电机体积大、效率低，适用于小功率系统；功率较较大时常用直流伺服电机。
- 3、动态响应：主要考虑电机的转动惯量、启动 / 堵转 / 运行转矩特性等，主要影响系统的机电时间常数。
- 4、“自转”现象：对于交流伺服电动机而言，参数选择不当或制造缺陷易导致“自转”现象，直流伺服电机无此问题。
- 5、电刷换向器：直流伺服电机结构复杂、接触电阻不稳，影响运行稳定性，且造成无线电干扰及火花，运行维护不方便。交流伺服电机结构简单，运行可靠，维护方便。