

微 控 电 机

本章教学基本要求

- 1.了解常用控制电机的主要结构、基本工作原理；
- 2.理解和掌握控制电机的分类方式及其各自的驱动方式；
- 3.比较控制电机与普通直流电机、异步电机和同步电机的异同之处；
- 4.了解控制电机的特点及其应用场合

重点

- 1.理解和掌握直流伺服电机和交流伺服电机各自的工作原理和调节特性；
- 2.理解和掌握步进电机的工作原理和通电方式。

概述

微控电机是具有特定功能的小功率旋转电机。控制电机在控制系统中作为执行元件、检测元件和运算元件。从工作原理上看，微控电机和普通电机没有本质上的区别，但在使用功能上不一样。普通电机功率大，侧重电机的起动、运行和制动等性能指标，而控制电机输出功率较小，侧重于电机的控制精度、响应速度和运行可靠性。

目前国内外生产的微控电机种类较多，下面介绍几种常用的微控电机的基本工作原理及其使用特性。

步进电动机

步进机将脉冲信号转换为角位移或线位移。主要要求：动作灵敏、准确、重量轻、体积小、运行可靠、耗电少等。

步进电动机

结构与基本工作原理

机理：步进电机是利用电磁铁原理，将脉冲信号转换成线位移或角位移的电机。每来一个电脉冲，电机转动一个角度，带动机械移动一小段距离。

特点： (1)来一个脉冲，转一个步距角。
(2)控制脉冲频率，可控制电机转速。
(3)改变脉冲顺序，改变方向。

步进电动机

种类：

根据励磁方式的不同分为：反应式、永磁式和混合式（又叫感应子式）三种。反应式步进电机的应用较多。

下面以反应式步进电机为例说明步进电机的结构和工作原理。

电机拖动 47讲

吉林大学

通信工程学院自动控制教研室

步进电动机

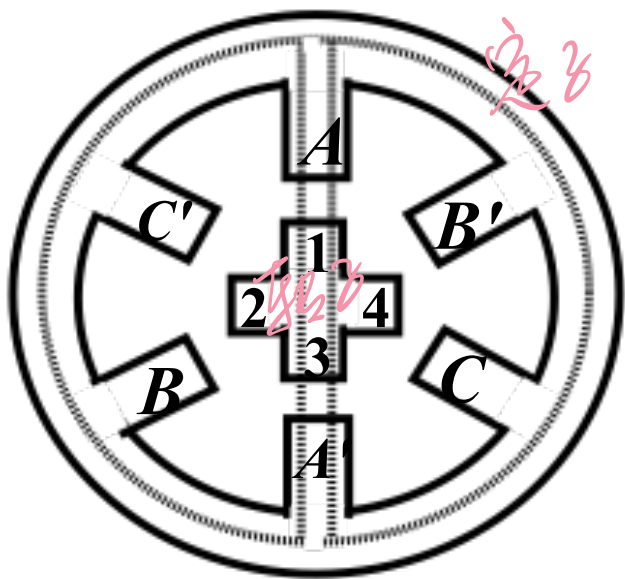


图 (a) 三相反应式步进电动机
工作原理图

A 相通电，A 方向的磁通经转子形成闭合回路。若转子和磁场轴线方向原有一定角度，则在磁场的作用下，转子

化，吸引转子，使转子齿磁置力图使通电相磁路的磁阻最小，使转、定子的齿对齐停止转

动
A 相通电使转子 1、3 齿和 AA' 对齐。

步进电动机

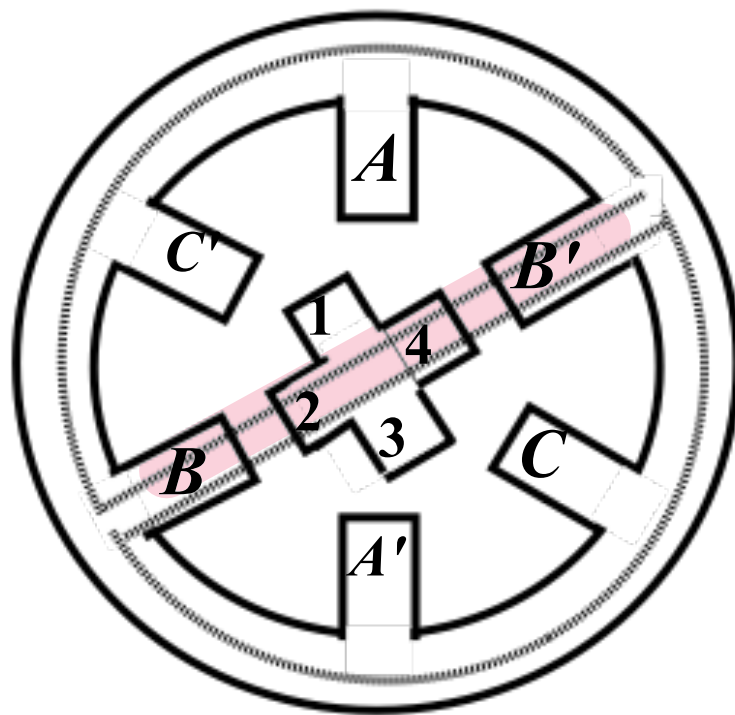


图 (b) 三相反应式步进电动机工作原理图

同理， B 相通电，转子2、4齿和 B 相轴线对齐，相对 A 相通电位置转 30° ；

步进电动机

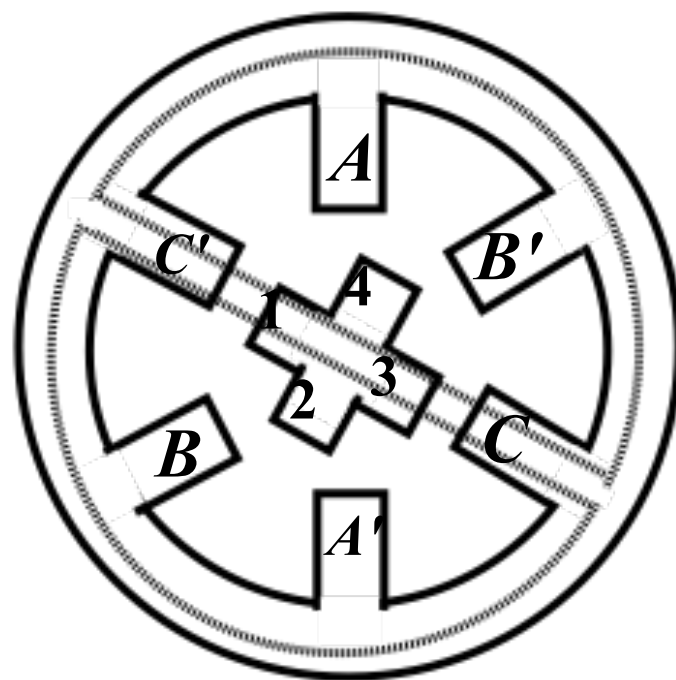


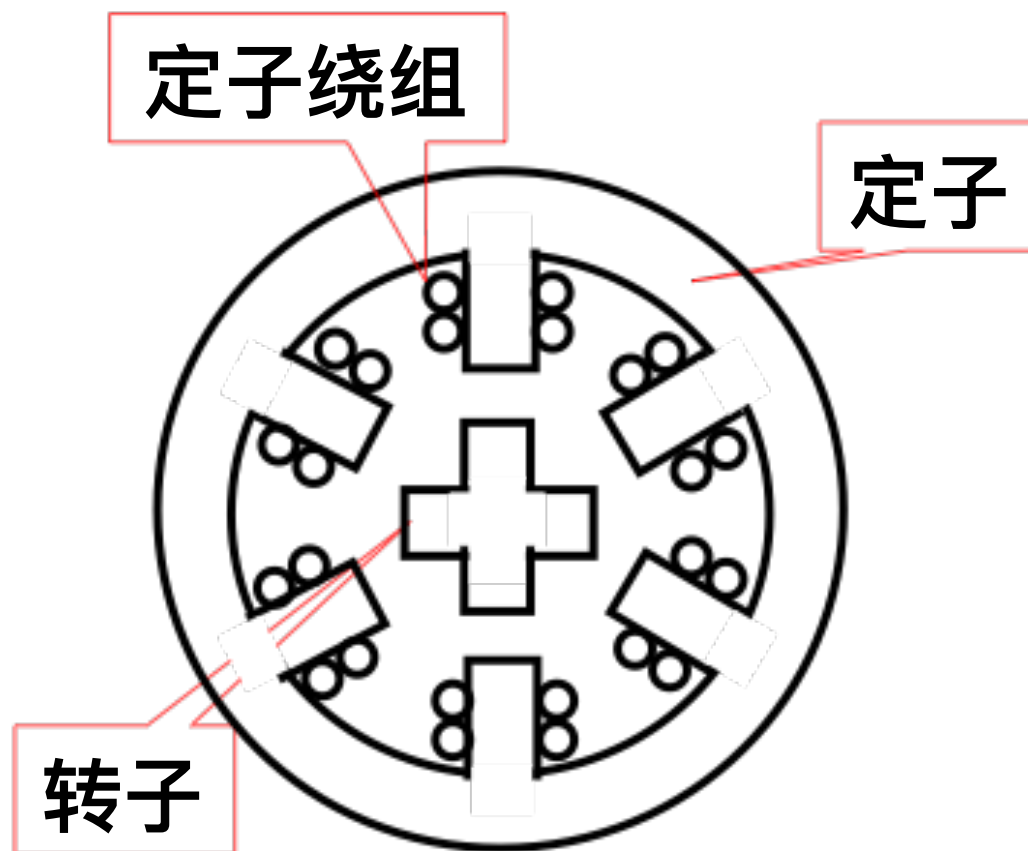
图 (c) 三相反应式步进电动机工作原理图

最后，C相通电，转子1、3齿和C相轴线对齐，
相对B相通电比较，转子再次转动30°。

步进电动机

1 结构

步进机主要由两部分构成：定子和转子。它们均由磁性材料构成，以三相为例其定子和转子上分别有六个、四个磁极。



步进电动机结构简图

步进电动机

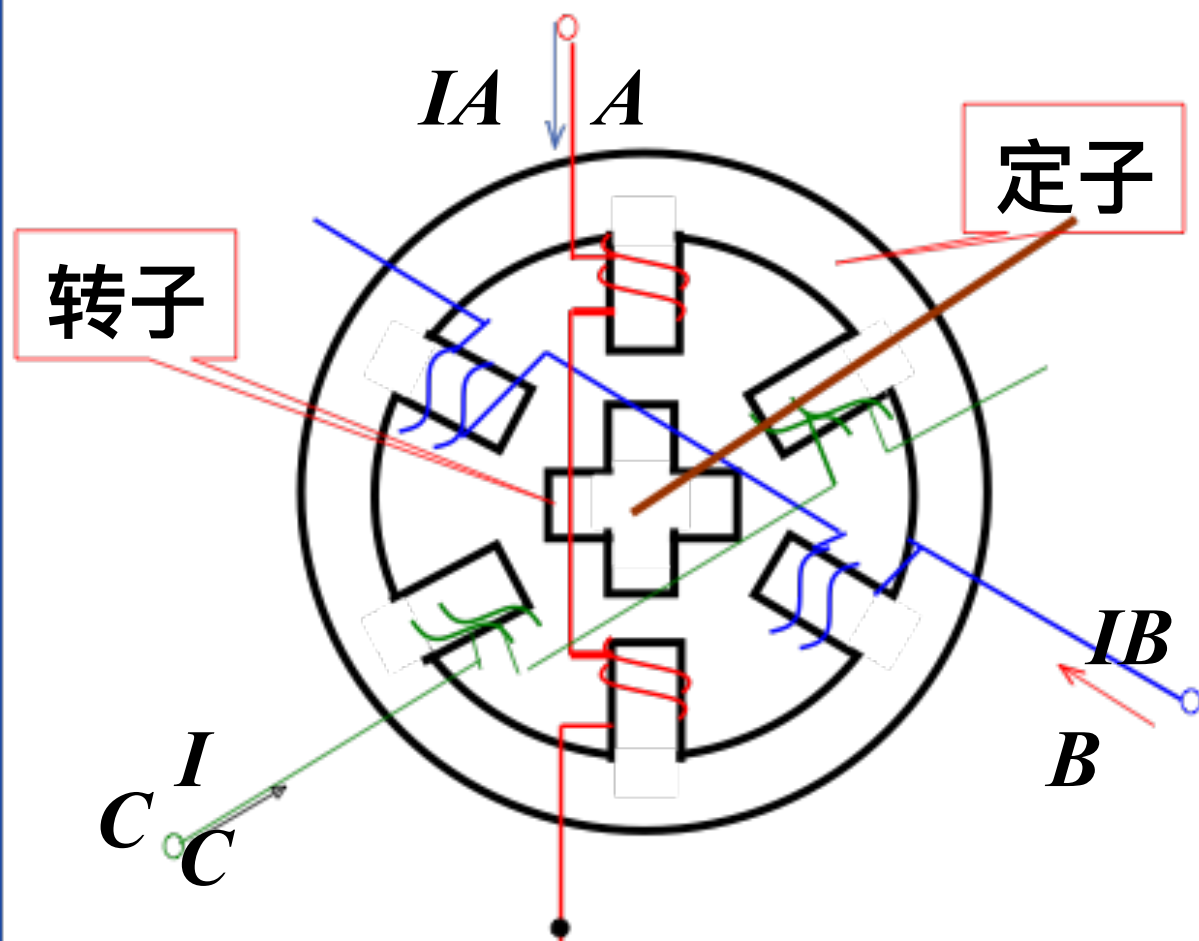


图 三相反应式步进电动机

定子的六个磁极
上有控制绕组，两个
相对的磁极组成一相。

注意：这里的相和交流电中的“相”的概念不同。步进机通的是直流电脉冲，这主要是指线图的联接和组数的

步进电动机

2 工作方式

(以三相步进电机为例)步进电机的工作方式可分为：三相单三拍、三相六拍、三相双三拍等。

一、三相单三拍

三相绕组中的通电顺序为：

A 相 \rightarrow B 相 \rightarrow C 相



通电顺序也可以为：

A 相 \rightarrow C 相 \rightarrow B 相



步进电动机

这种工作方式，因三相绕组中每次只有一相通电，而且，一个循环周期共包括三个脉冲，所以称三相单三拍。

三相单三拍的特点：

- (1) 每来一个电脉冲，转子转过 30° 。此角称为步距角，用 α 表示。
- (2) 转子的旋转方向取决于三相线圈通电的顺序，改变通电顺序即可改变转向。

步进电动机

步进电机单相单三拍的工作方式总结

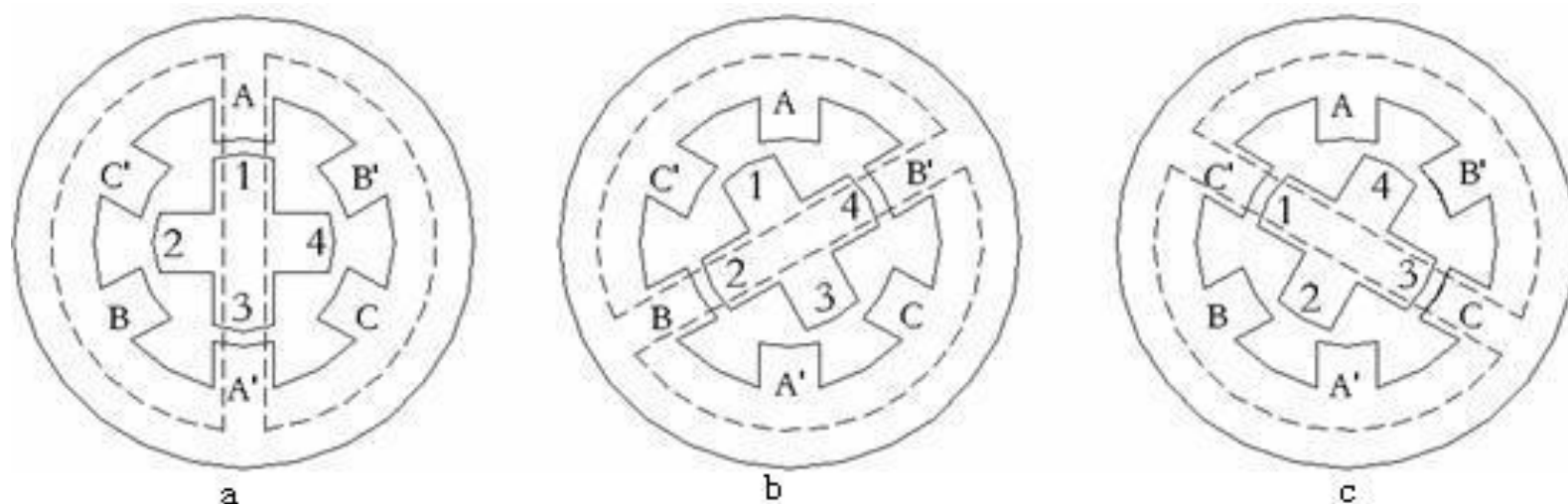


图 步进电机的三相单、双六拍运行方式

单三拍：每一次只有一相绕组通电，三次通电完成一个循环。

每一拍转子转过的角度称步距角。

通电顺序： A-B-C-A

反转通电顺序： A-C-B-A

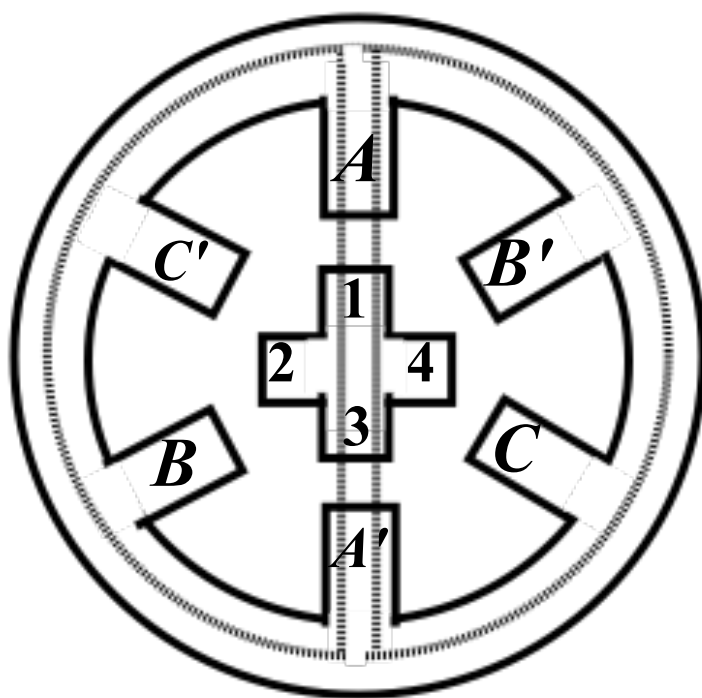
步进电动机

二、三相六拍

三相绕组的通电顺序为：

$A \square AB \square B \square BC \square C \square CA \square A$ 共六拍。

工作过程：



A相通电，转子1、3齿和A A' 相对齐。

步进电动机

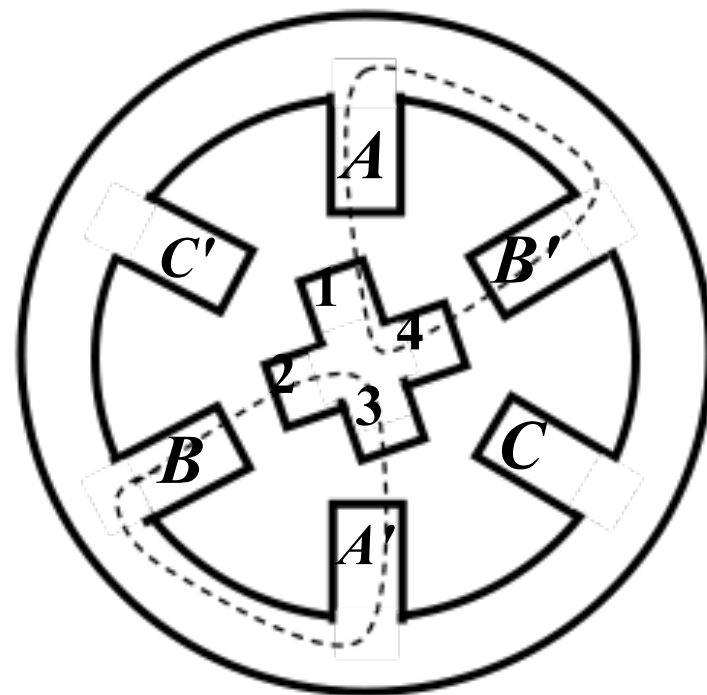
当控制绕组A相和B相同时通电，转子2，4齿受到反应转矩作用使转子逆时针方向转动，同时1、3齿不再

与AA'对齐，而是受到一个顺时针的转矩作用，当这两个方向相反的转矩大小相等

使，转子停止转动，如左图

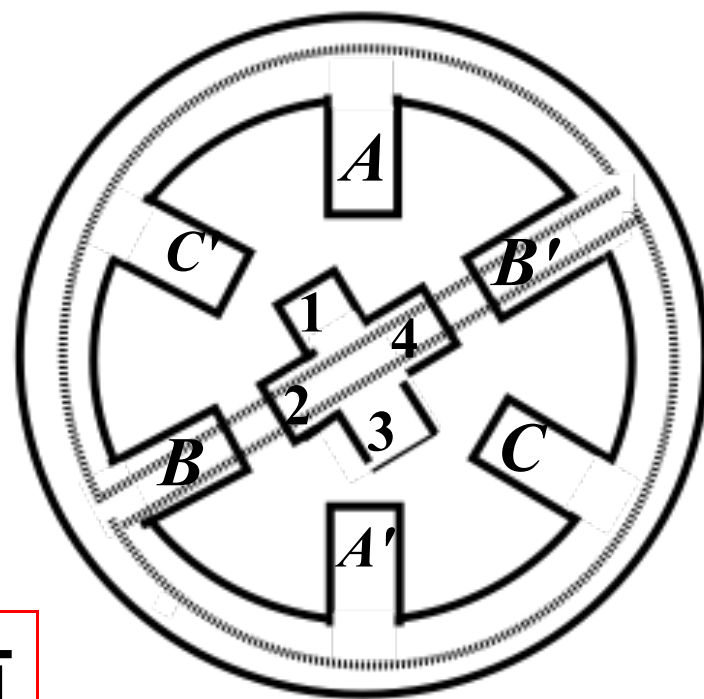
所示。转子转到两磁拉力平衡的位置上。相对AA'

通电，转子转了15°。



步进电动机

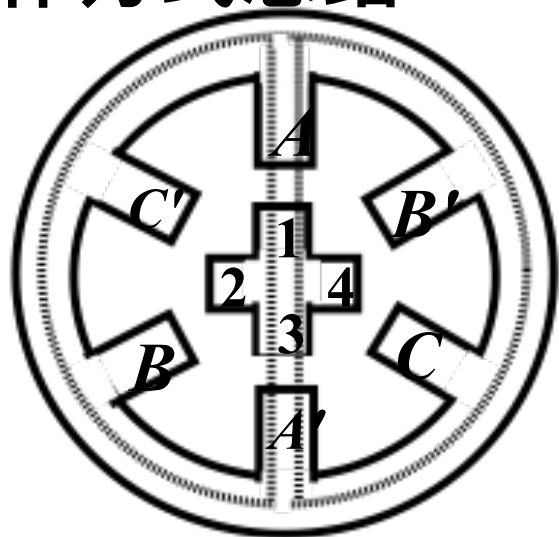
当A相断电，而保持B相通电，转子2、4齿和B相对齐，又转了15°。



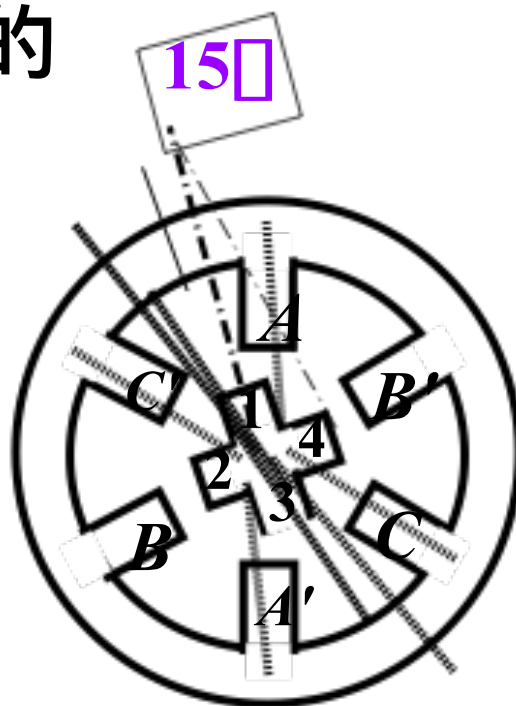
总之，每个循环周期，有六种通电状态，所以称为三相六拍，步距角为15°。

步进电动机

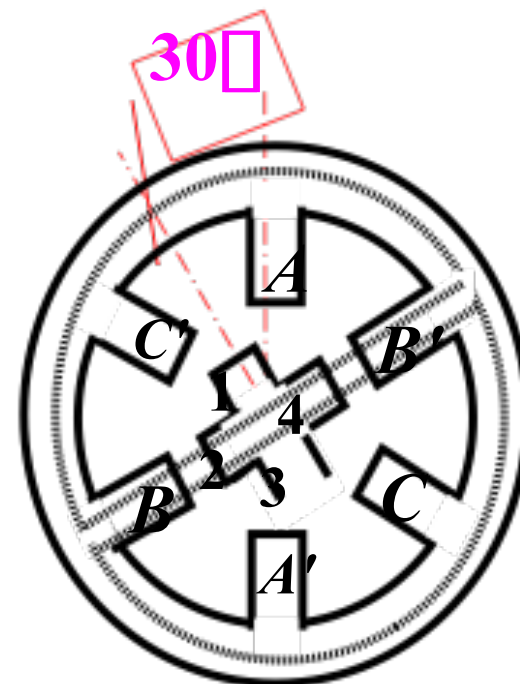
步进电机三相六拍的工作方式总结



A相通电



(b) AB 相通电



(c) B 相通电

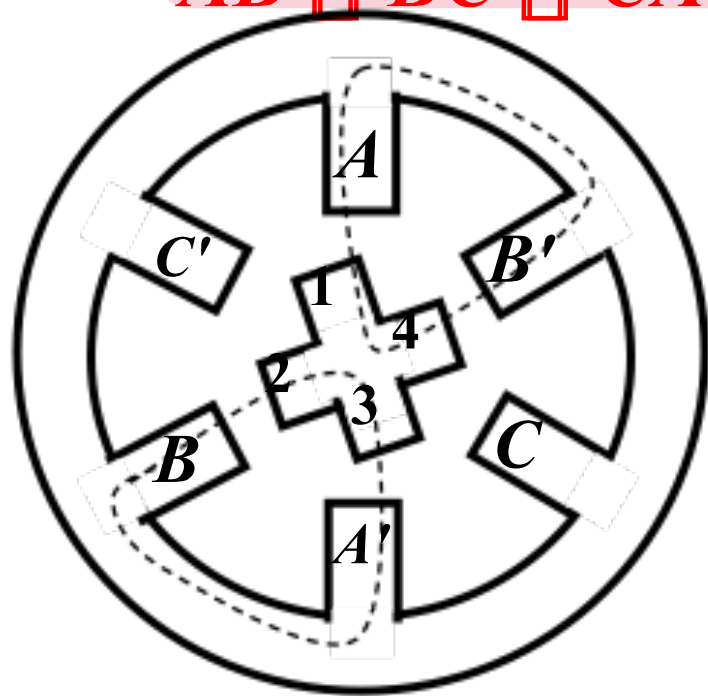
通电顺序：A—AB—B—BC—C—CA—A

反转通电顺序：A—CA—C—BC—B—AB—A

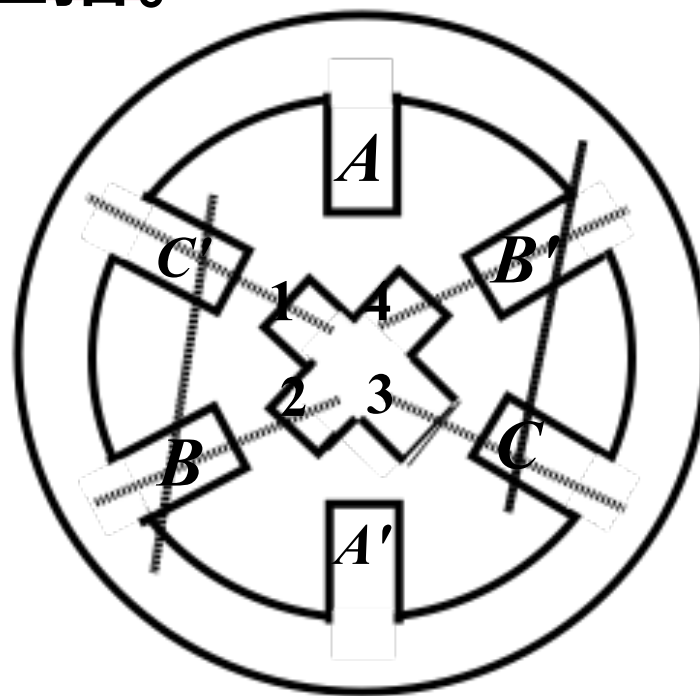
步进电动机

三相绕组的通电顺序为：

$AB \square BC \square CA \square AB$ 共三拍。 双三拍

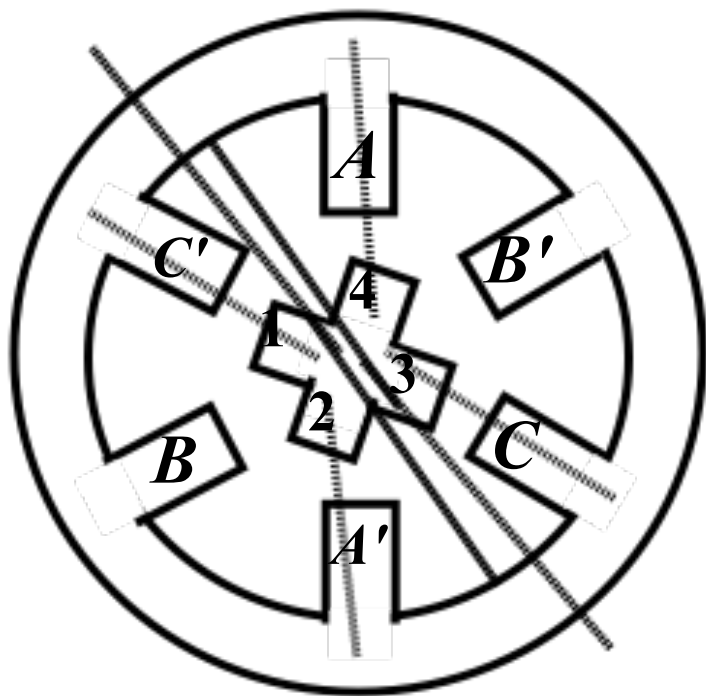


AB 通电



BC 通电

步进电动机



CA通电

工作方式为三相双三拍时，每通入一个电脉冲，转子也是转 30° ，即 $\Delta\theta = 30^\circ$ 。

以上三种工作方式，三相双三拍和三相六拍较三相单三拍稳定，因此较常采用。

步进电动机

步进电机三相双三拍的工作方式总结 每次有两相绕组通电

通电顺序：AB – BC – CA – AB

反转通电顺序：AB – CA – BC – AB

工作方式为三相双三拍时，每通入一个电脉冲，转子转 30° ，即 $\Delta\theta = 30^\circ$ 。

步进电动机

以上三种工作方式，三相双三拍和三相六拍较三相单三拍稳定，因此较常采用。

每个定子磁极下的转子齿数不能为整数，而应相差 $1/m$

$$\frac{Z_r}{2mp} = k \pm \frac{1}{m}$$

其中， m 为相数， p 为磁极对数， k 为整数

$$\text{步距角: } \theta_b = \frac{360^\circ}{Z_r N}$$

$$\text{齿距角: } \frac{360^\circ}{Z_r}$$

Z_r : 转子齿数;

N : 循环的拍数。

步进电动机

步进机通过一个电脉冲,转子转过的角度,称为步距角。

步距角

$$\theta_b = \frac{360^\circ}{Z_r N}$$

N : 一个周期的运行拍数

Z_r : 转子齿数

如: $Z_r=40$, $N=3$ 时 $\theta_b = \frac{360^\circ}{40 \times 3} = 3^\circ$

转速

$$n = \frac{60 f \theta_b}{360}$$

f : 电脉冲的频率

步进电动机

运行特性

步进电动机不改变通电情况的运行状态称为静态运行。电机定子齿与转子齿中心线之间的夹角 θ 叫做失调角，用电角度表示。步进电机静态运行时转子受到的反应转矩 T 叫做静转矩，通常以 θ 增加的方向为正。步进电机的静转矩 T 与失调角 θ 之间的关系 $T=f(\theta)$ 叫做矩角特性。

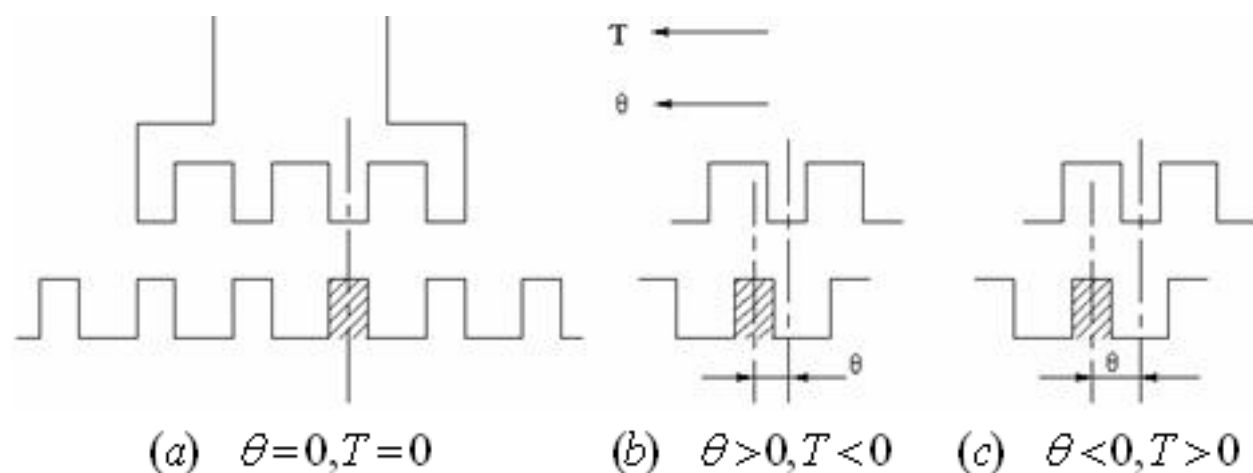


图 步进电动机的转矩和转角

步进电动机

当接入控制绕组的脉冲频率较低，电机转子完成一步之后，下一个脉冲才到来，电机呈现一转一停的状态，故称之为步进运行状态。负载（即空载）时步进电机的运行状态如下图所示。

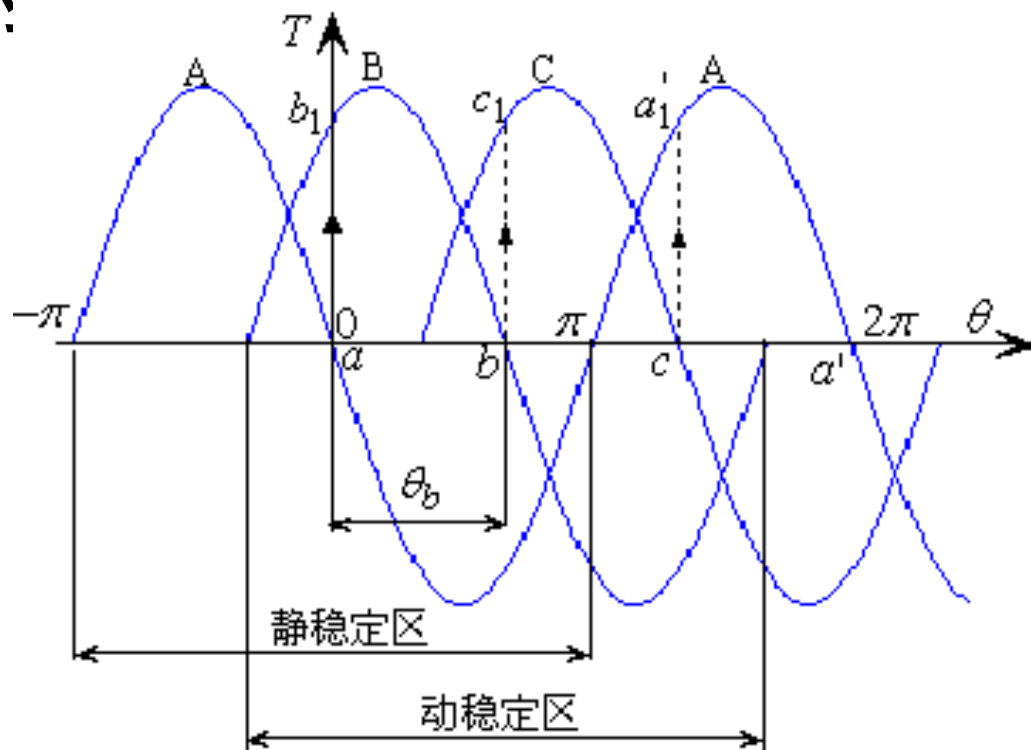


图 步进电动机空载运行状态

步进电动机

上面是步进电机空载步进运行时的情况，当步进电机带上负载运行时情况有所不同。带上负载 T_L 后，转子每走一步不再停留在稳定平衡点，而是停留在静转矩 T 等于负载转矩的点上，如下图，在 $a1$ 、 $b1$ 、 $c1$ 处， $T=T_L$ ，

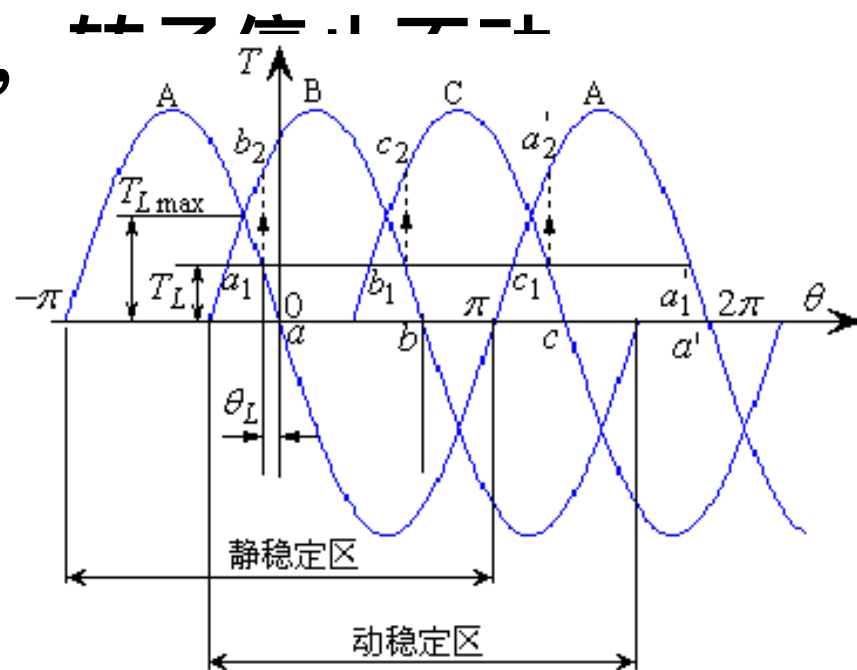


图 步进电动机负载运行状态

步进电动机

驱动电源

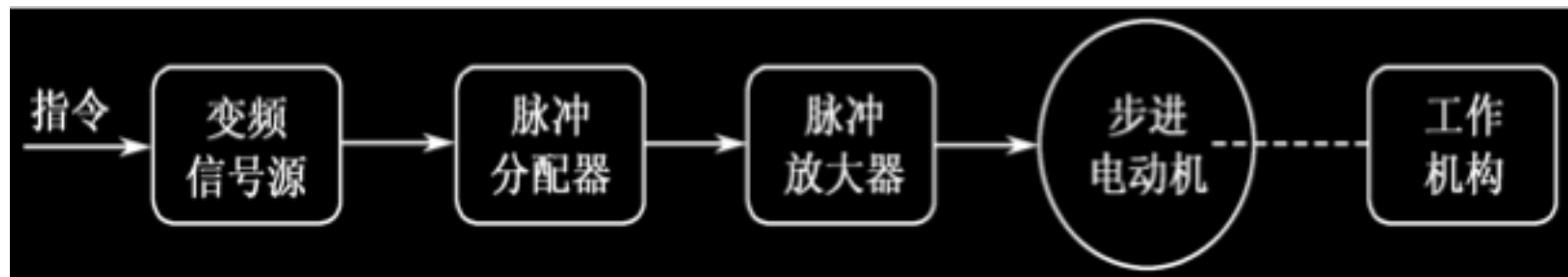


图 步进电动机的驱动电路方框图

脉冲分配器： 决定步进电机定子绕组通电顺序和电机转速的电路。

功率放大器： 分配器输出的脉冲信号必须经过功率放大，才能作为励磁电流送到步进电机定子绕组。

步进电动机

步进电机的应用

主要用于数字控制系统中，精度高，运行可靠。如采用位置检测和速度反馈，亦可实现闭环控制。步进电动机已广泛地应用于数字控制系统中，如数模转换装置、数控机床、计算机外围设备、自动记录仪、钟表等之中，另外在工业自动化生产线、印刷设备等中亦有应用。

电机拖动 48讲

吉林大学

通信工程学院自动控制教研室

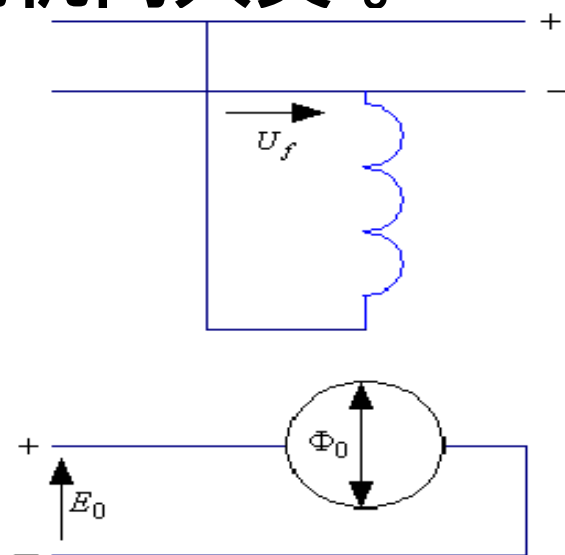
测速发电机

n

测速发电机是一种测量转速的微型发电机，他把输入的机械转速变换为电压信号输出，并要求输出的电压信号与转速成正比。测速发电机分直流测速发电机和交流测速发电机两大类。

直流测速发电机

直流测速发电机本质上是一种微型直流发电机，按定子磁极的励磁方式分为电磁式和永磁式。直流测速发电机的工作原理与一般直流发电机相同。



直流测速发电机的工作原理

测速发电机

在恒定的磁场 Φ_0 中，外部的机械转轴带动电枢以转速 n 旋转，电枢绕组切割磁场从而在电刷间产生电动势。

$$E_0 = C_0 \Phi_0 n$$

测速发电机

空载时，直流测速发电机的输出电压等于电枢电动势，即 $U_0=E_0$ 。有负载时，若电枢电阻为 R_a ，负载电阻为 R_L ，则直流测速发电机的输出电压为

$$U = E_0 - IR_a = E_0 - \frac{U}{R_L} R_a \Rightarrow U = \frac{R_L}{R_L + R_a} C_0 \Phi_0 n$$
$$= kn$$

其中 $k = \frac{R_L}{R_L + R_a} C_0 \Phi_0$

测速发电机

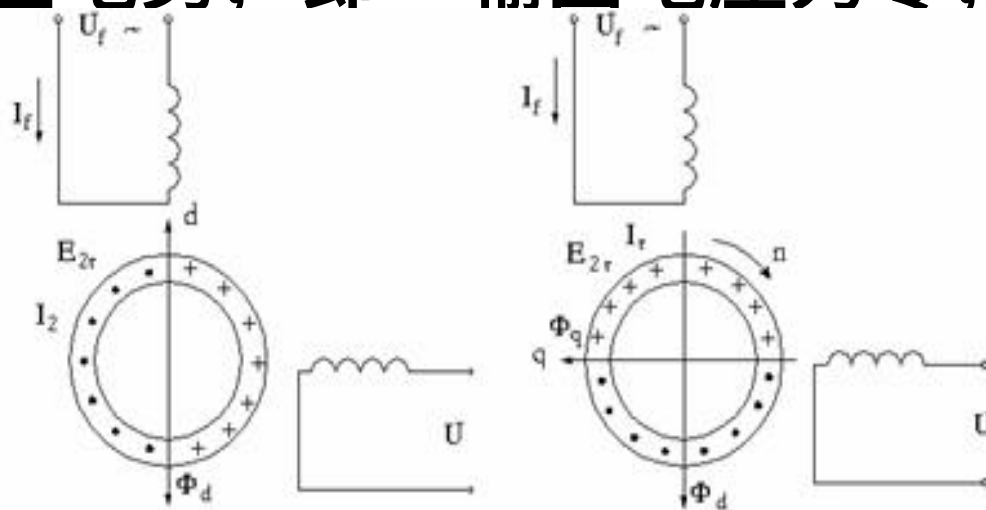
交流测速发电机

交流异步测速发电机的转子结构有笼型的，也有杯型的，在控制系统中多用空心杯转子异步测速发电机。空心杯转子异步测速发电机定子上有两个在空间上相互差 90° 电角度的绕组，一为励磁绕组，另一为输出绕组。

测速发电机

转子静止：

励磁绕组产生的磁通在转子绕组上感应电势，产生电流。转子磁势不与输出绕组交链，所以，输出绕组不感应电势，即：输出电压为零， $U=0$ 。



空心杯转子异步测速发电机原理图

测速发电机

交流异步测速发电机的误差主要有：

- 非线性误差：由于直轴磁通 Φ_d 变化使测速发电机产生非线性误差；
- 剩余电压：实际运行中，转子静止时，测速发电机输出一个较小的电压；
- 相位误差：由于励磁绕组的漏抗、空心杯转子的漏抗使输出电压与励磁电压的相位不同。

交流同步测速发电机分为：永磁式、感应式和脉冲式。

单相异步电动机

n

单相异步电动机(single-phase asynchronous motor)是靠220V单相交流电源供电的一类电动机，它适用于只有单相电源(single-phase power)的小型工业设备和家用电器中。

单相异步电动机的工作原理

在交流电机中，当定子绕组通过交流电流时，建立了电枢磁动势，它对电机能量转换和运行性能都有很大影响。所以单相交流绕组通入单相交流产生脉振磁动势，该磁动势可分解为两个幅值相等、转速相反的旋转磁动势和，从而在气隙中建立正传和反转磁场和。这两个旋转磁场切割转子导体，并分别在转子导体中产生感应电动势和感应电流。

单相异步电动机

该电流与磁场相互作用产生正、反电磁转矩。正向电磁转矩企图使转子正转；反向电磁转矩企图使转子反转。这两个转矩叠加起来就是推动电动机转动的合成转矩。

不论是正转还是反转，他们的大小与转差率的关系和三相异步电动机的情况是一样的。对正转磁场而言，转差率为：

$$s^+ = \frac{n_1 - n}{n_1} = s$$

对反转磁场而言，转差率为：

$$s^- = \frac{-n_1 - n}{-n_1} = 2 - s$$

单相异步电动机

单相异步电动机的T-s曲线见左图

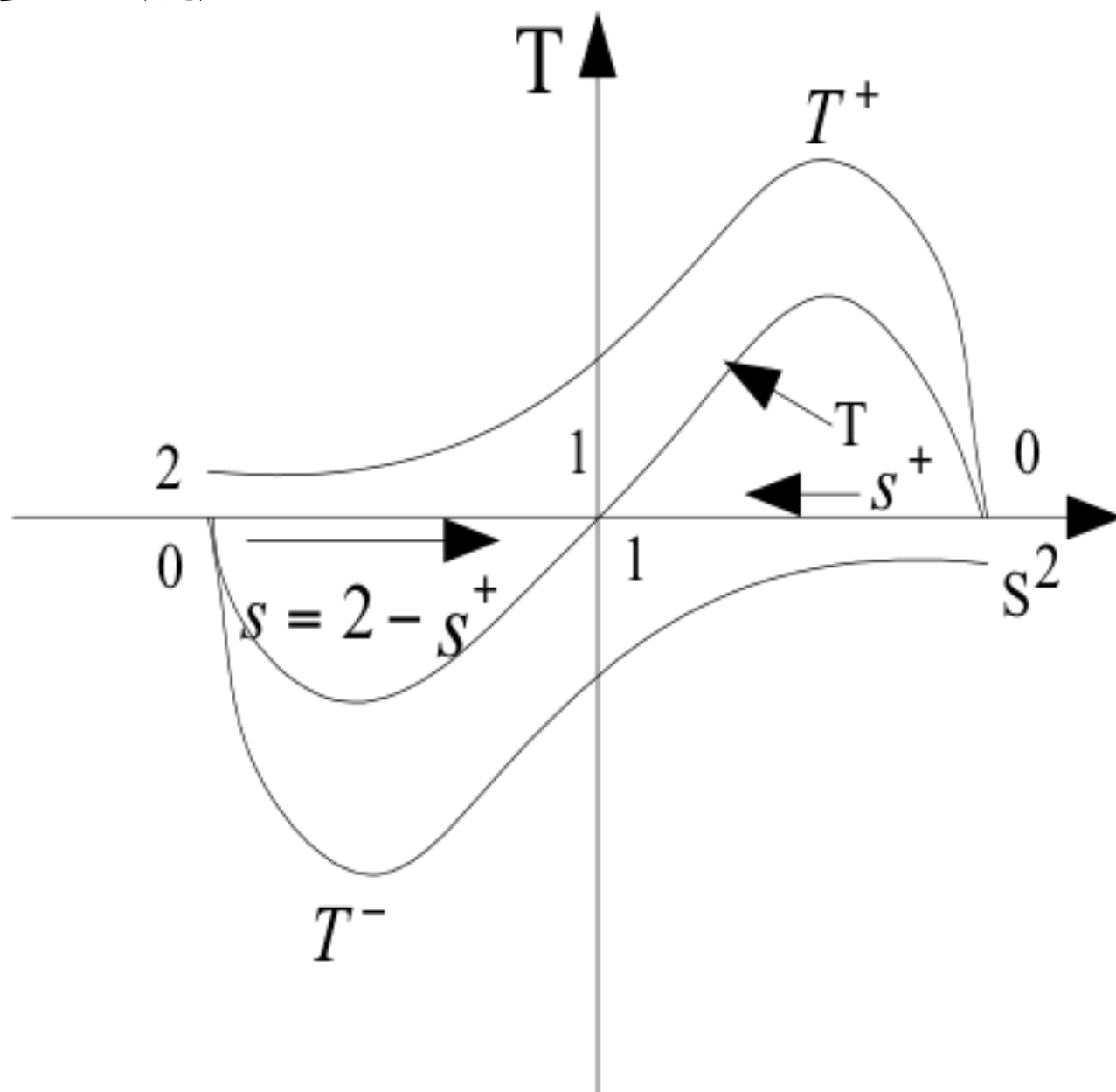
由图可知单相异步电动机的主要特点有：

(1) $n=0, s=1, T=T_+ + T_- = 0$ ，说明单相异步电动机无启动转矩，如不采取其他措施，电动机不能启动。

(2) 当 $s \neq 1$ 时， $T \neq 0$ ， T 无固定方向，它取决于 s 的正、负。

(3) 由于反向转矩存在，使合成转矩也随之减小
单相异步电动机的过载能力较低。

单相异步电动机

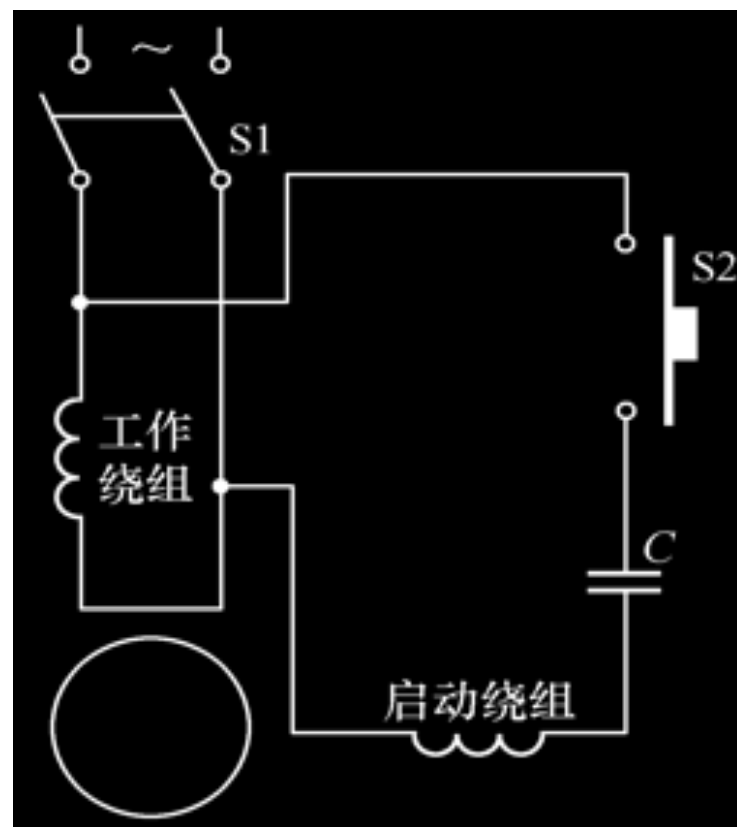


单相异步电动机

电容分相式启动

工作原理

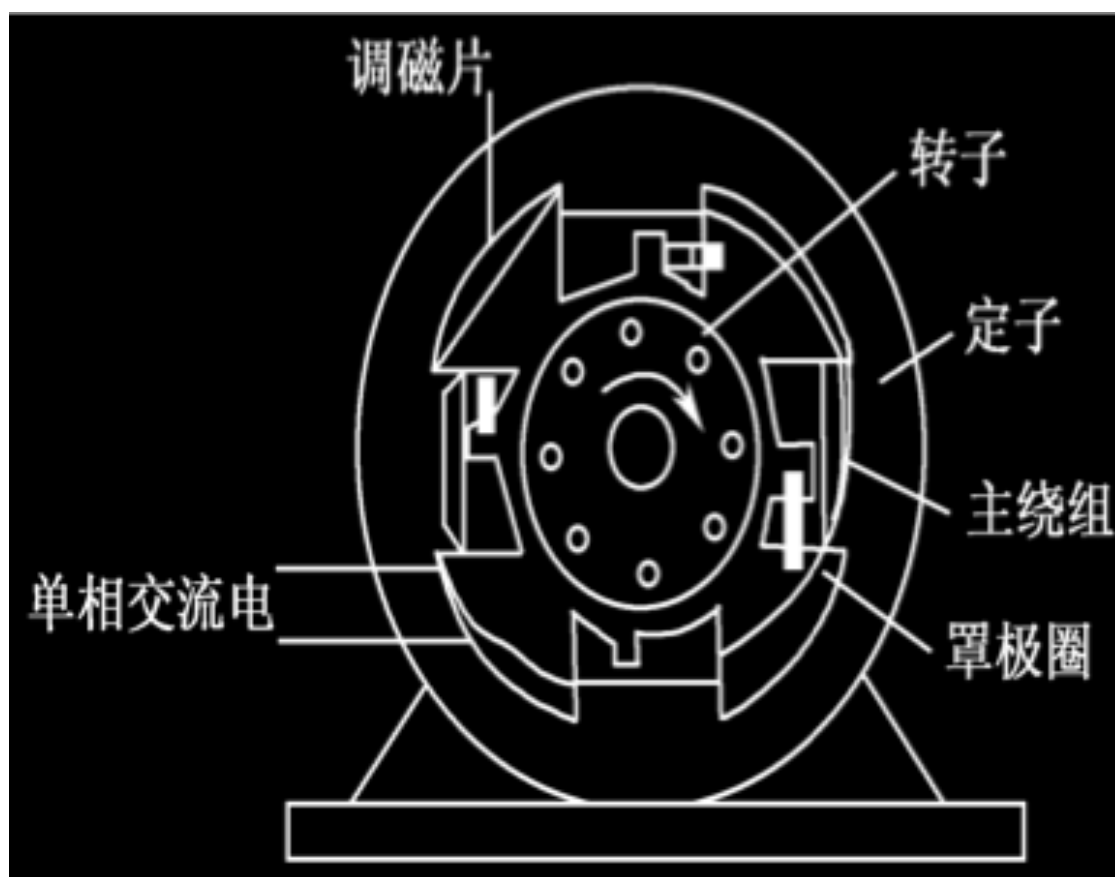
启动时开关K闭合，使两绕组电流 I_1 I_2 相位差约为 90° ，从而产生旋转磁场，电机转起来；转动正常以后离心开关被甩开，启动绕组被切断。



单相异步电动机

罩极式单相电机

定子通入电流以后，部分磁通穿过短路环，并在其中产生感应电流。短路环中的电流阻碍磁通的变化，致使有短路环部分和没有短路环部分产生的磁通有了相位差，从而形成旋转磁场，使转子转起来。



单相异步电动机

上图中电机的转动方向：瞬时针旋转。因为没有短路环部分的磁通比有短路环部分的磁通领先。

单相异步电机的使用

单相异步电动机的功率小，主要制成小型电机。它的应用非常广泛，如家用电器（洗衣机、电冰箱、电风扇）、电动工具（如手电钻）、医用器械、自动化仪表等。

伺服电动机

伺服电动机(servo motor)的功能是将所输入的电压信号转换为轴上的角位移或角速度输出，其转速和转向随输入电压信号的大小和方向变化而改变的控制电机。伺服电动机能带一定的负载，在自动控制系统中作执行元件，所以又称为执行电动机。例如数控车床，刀具由伺服电动机拖动，他会按照给定目标的形状拖动刀具进行切割器件。早期伺服电动机输出功率较小，功率范围一般为0.1~100瓦，而目前伺服技术发展很快，几千瓦的大功率伺服电动机相继出现。

伺服电动机



伺服电动机

伺服电动机可控性好，反应迅速。是自动控制系统和计算机外围设备中常用的执行元件。

伺服电动机可分为两类：

交流伺服电动机

直流伺服电动机

伺服电动机

直流伺服电动机

原理： 直流伺服电动机的结构与直流电动机基本相同。只是为减小转动惯量，电机做得细长一些。所不同的是电枢电阻大，机械特性软、线性（电阻大，可弱磁起动、可直接起动）。

供电方式： 他励供电。励磁绕组和电枢分别两个独立的电源供电。

伺服电动机

控制方式：

- 1.电枢控制（主要）；
- 2.磁极控制（少用）。

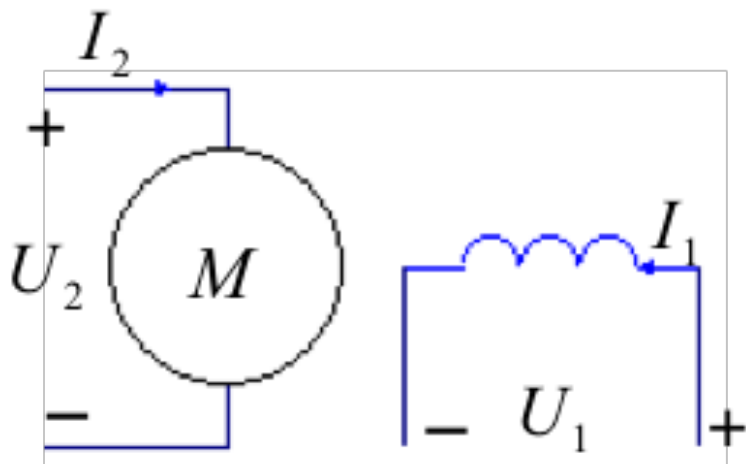


图 直流伺服电动机的接线图

U_1 为励磁电压，
 U_2 为电枢电压

伺服电动机

直流伺服电机的机械特性与他励直流电机相同一样，也可用下式表示

$$n = \frac{U_2}{K_E \Phi} - \frac{R_a}{K_E K_T \Phi^2} T$$

机械特性曲线如图所示。

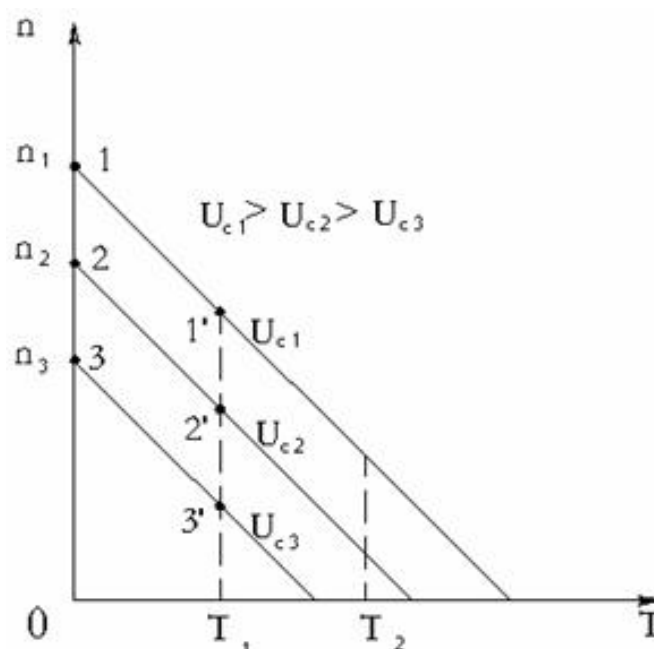


图7-10 机械特性

由机械特性可知：

- (1) 一定负载转矩下，当磁通 Φ 不变时， $U_2 \propto n$ 。
- (2) $U_2=0$ 时，电机立即停转。

电动机反转：改变电枢电压的极性，电动机反转。

伺服电动机

直流伺服电动机
的特点：电阻大，
机械特性软。线
性；滑动接触；火
花干扰；惯性大；
体积大；相对价
高，其调节特性如
左图所示。

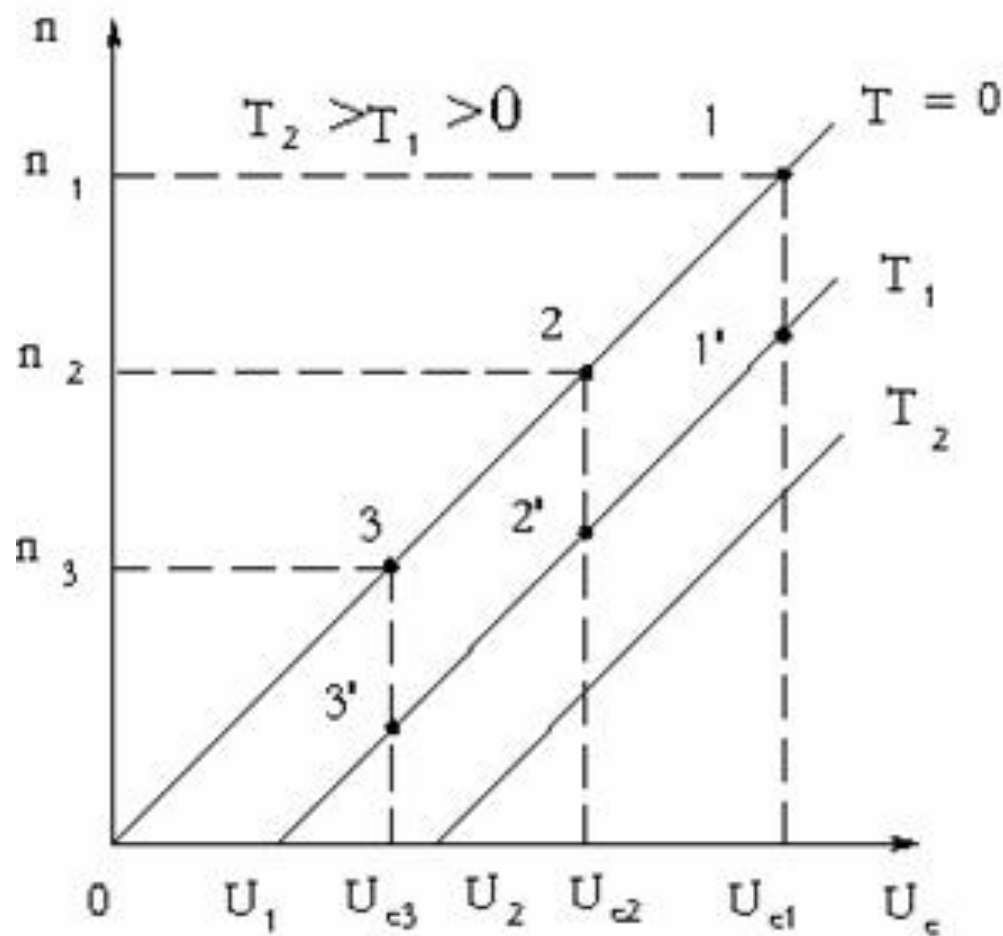


图7-11 调节特性

伺服电动机

应用：

直流伺服电机的特性较交流伺服电机硬。通常应用于功率稍大的系统中，如随动系统中的位置控制等。

伺服电动机

交流伺服电动机

两相交流异步电机。它的定子上装有空间互差 90° 的两个绕组：励磁绕组和控制绕组，其结构如图所示。

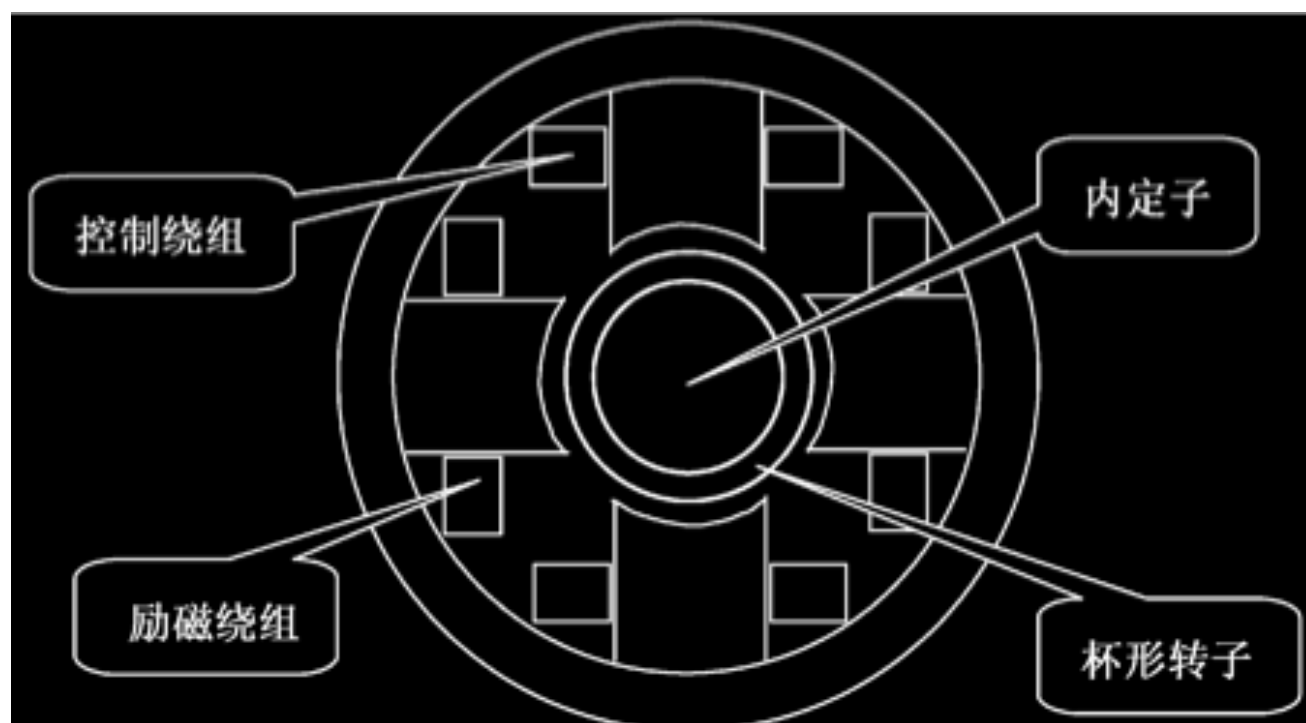


图7-12 交流伺服电动机结构图

伺服电动机

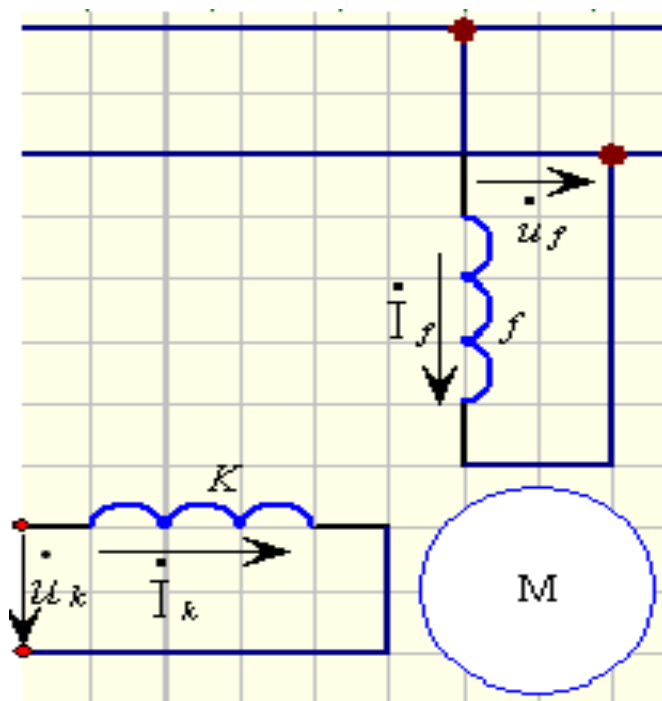


图 交流伺服电机的电气原理

通过相应措施使通入两个绕组的电流相位差接近 90° ,从而产生所需的旋转磁场。

伺服电动机

交流伺服电动机的控制方式

(1) 幅值控制

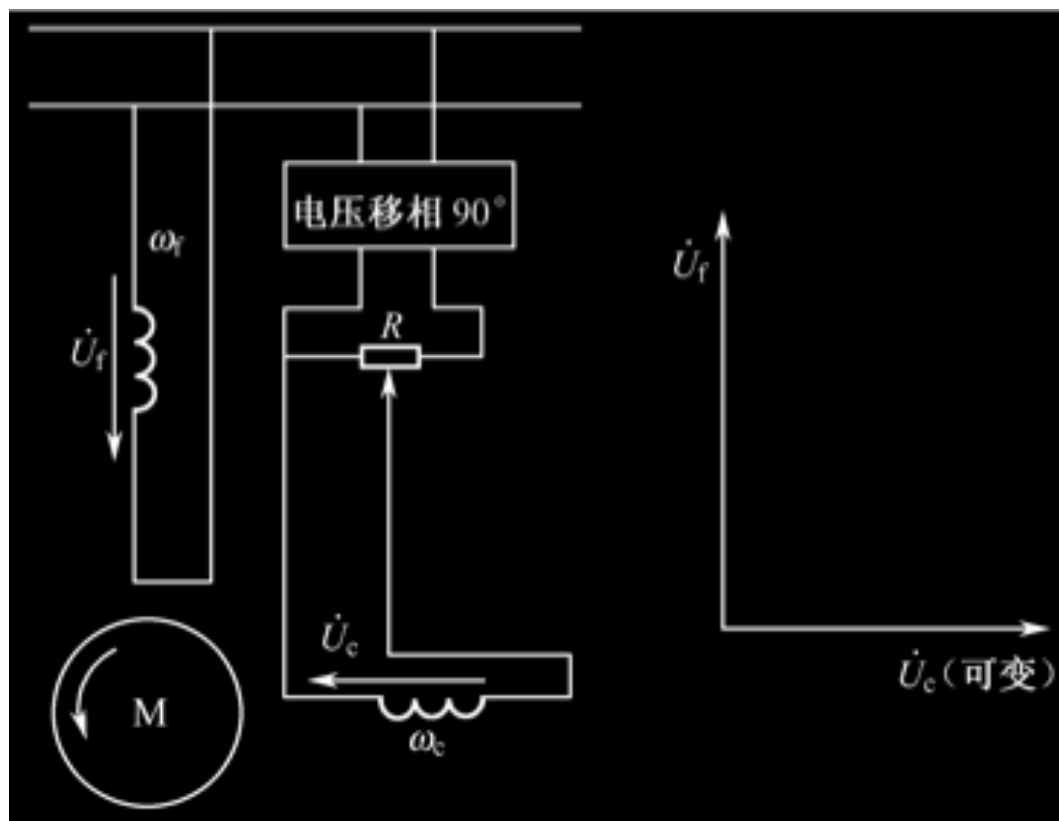


图 幅值控制

伺服电动机

交流伺服电动机的机械特性如图所示。

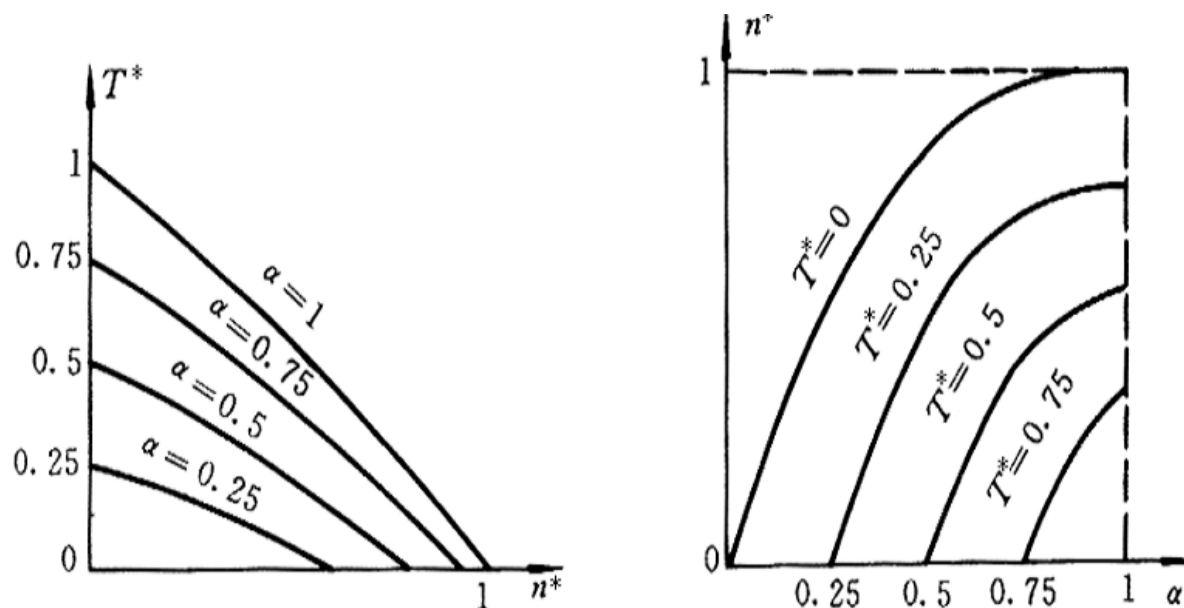


图 交流伺服电动机的机械特性和调节特性

在励磁电压不变的情况下，随着控制电压的下降，特性曲线下移。在同一负载转矩作用时，电动机转速随控制电压的下降而均匀减小。

伺服电动机

交流伺服电动机的控制方式

(2) 相位控制

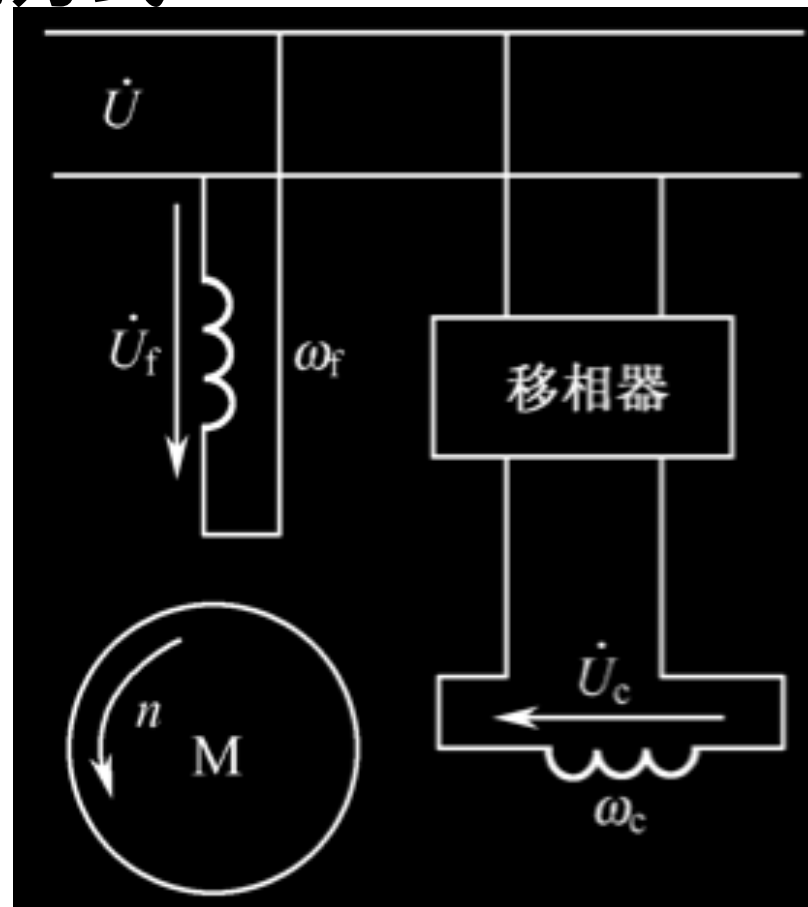


图 相位控制

伺服电动机

交流伺服电动机的控制方式

(3) 幅值-相位控制

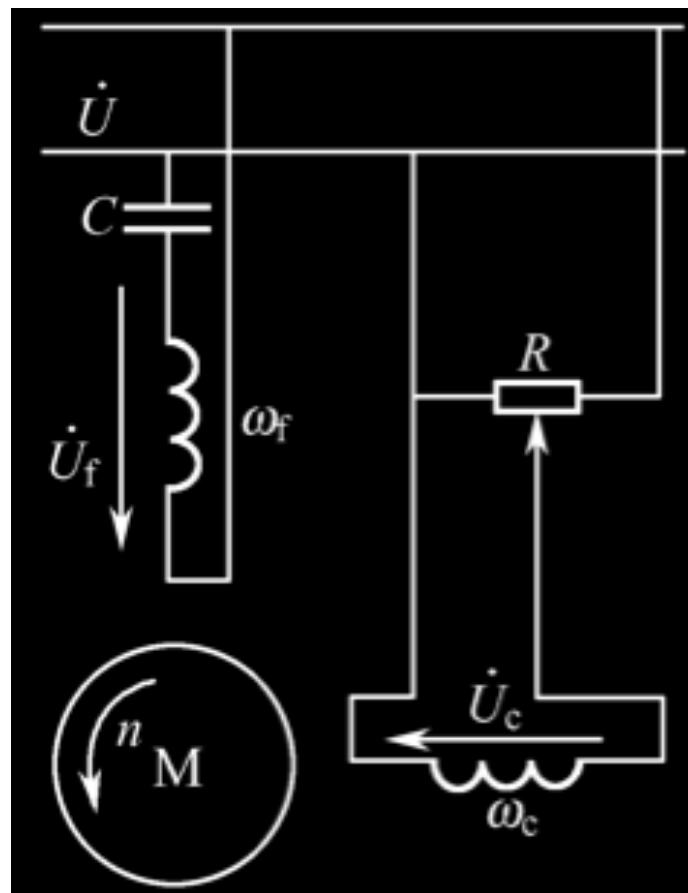


图 幅值-相位控制

伺服电动机

加在控制绕组上的控制电压反相时(保持励磁电压不变), 由于旋转磁场的旋转方向发生变化, 使电动机转子反转。

交流伺服电动机的特点: 在电动机运行时如果控制电压变为零, 电动机立即停转。

伺服电动机

应用:

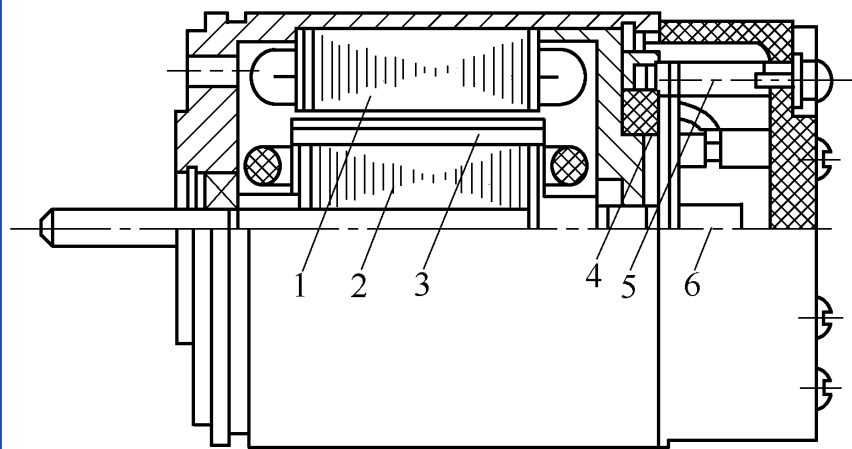
交流伺服电机的输出功率一般为 $0.1-100\text{ W}$ ，电源频率分 50Hz 、 400Hz 等多种。它的应用很广泛，如用在各种自动控制、自动记录等系统中。

自整角机

自整角机在自动控制系统中用做角度的传输、指示或变换，通常将两台或多台相同的自整角机组合起来使用。自整角机有控制式和力矩式两种，其用途不同。力矩式自整角机用做远距离转角指示，控制式自整角机可以将转角转换成电信号。

自整角机的结构分成定子和转子两大部分，接触式自整角机结构如图下图所示。

其他控制微电机



1—定子；2—转子；3—阻尼绕组；
4—电刷；5—接线柱；6—滑环

图 自整角机的基本结构

力矩式自整角机的转子多采用两极的凸极结构，对频率较高、规格较大的力矩式自整角机采用隐极结构。控制式自整角机的接收机转子采用隐极结构。通常，定子铁心槽内嵌有接成星形的三相对称绕组，称之为整步绕组。转子铁心槽内嵌有单相绕组，称之为励磁绕组。励磁绕组通过滑环和电刷装置

1 控制式自整角机的工作原理

控制式自整角机的工作原理可以由左图来说明。图中由结构、参数均相同的两台自整角机构成自整角机组。一台用来发送转角信号，它的励磁绕组接到单相交流电源上，称为自整角发送机，用 ZKF 表示。另一台用来接收转角信号并将转角信号转换成励磁绕组中的感应电动势输出，称之为自整角接收机，用 ZKJ 表示。两台自整角机定子中的整步绕组均接成星形，三对相序相同的相绕组分别接成回路。

其他控制微电机

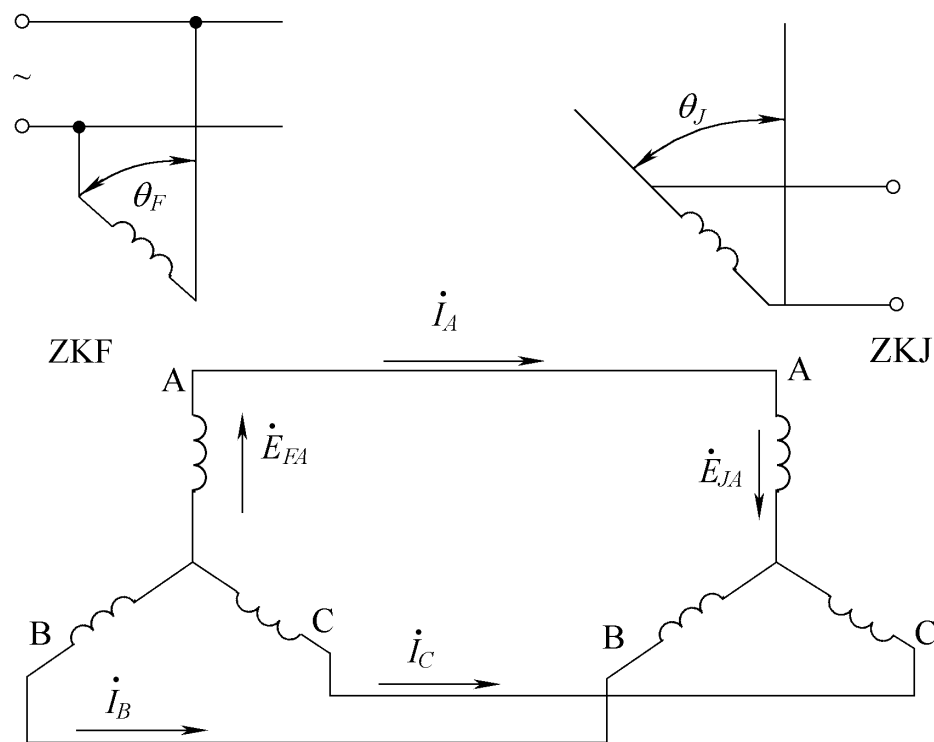


图 控制式自整角机工作原理图

其他控制微电子

在自整角发送机的励磁绕组中通入单相交流电流时，两台自整角机的气隙中都将产生脉振磁场，其大小随时间按余弦规律变化。脉振磁场使自整角发送机整步绕组的各相绕组生成时间上同相位的感应电动势，电动势的大小取决于整步绕组中各相绕组的轴线与励磁绕组轴线之间的相对位置。当整步绕组中的某一相绕组轴线与励磁绕组轴线重合时，该相绕组中的感应电动势为最大值，用 E_{Fm} 表示电动势的最大值。

其他控制微电子

设发送机整步绕组中的A相绕组轴线与其对应的励磁绕组轴线的夹角为 θ_J ，接收机整步绕组中的A相绕组轴线与其对应的励磁绕组轴线的夹角为 θ_F ，如图上图所示。发送机整步绕组中各相绕组的感应电动势有效值为

$$E_{FA} = E_{Fm} \cos \theta_F$$

$$E_{FB} = E_{Fm} \cos(\theta_F - 120^\circ)$$

$$E_{FC} = E_{Fm} \cos(\theta_F - 240^\circ)$$

其他控制微电机

可以证明：接收机励磁绕组的合成电动势，即输出电动势 E_0 为

$$E_0 = E_{0m} \cos \theta$$

式中 E_{0m} ——最大输出电动势有效值

从上式看出，失调角 $\theta=0$ 时，接收机的输出电动势为最大而不是零，且与失调角 θ 有余弦关系的输出电动势不能反映发送机转子的偏转方向，故很不实用。实际的自整角机是将接收机转子绕组轴线与发送机转子绕组轴线垂直时的位置作为计算 θ 的起始位置。此时，输出电动势表示为

其他控制微电机

由于接收机转子不能转动，即是恒定的。//J控制式自整角机的输出电动势的大小反映了发送机转子的偏转角度，输出电动势的极性反映了发送机转子的偏转方向，从而实现了将转角转换成电信号。

$$E_0 = E_{0m} \cos(\theta - 90^\circ) = E_{0m} \sin \theta$$

其他控制微电子

2 力矩式自整角机的工作原理

力矩式自整角机的工作原理可以由左图来说明。图中由结构、参数均相同的两台自整角机构成自整角机组，一台用来发送转角信号，称自整角发送机，用 ZLF 表示；另一台用来接收转角信号，称为自整角接收机，用 ZLJ 表示。两台自整角机中的整步绕组均接成星形，三对相序相同的相绕组分别连接成回路。两台自整角机转子中的励磁绕组接在同一个单相交流电源上。

其他控制微电机

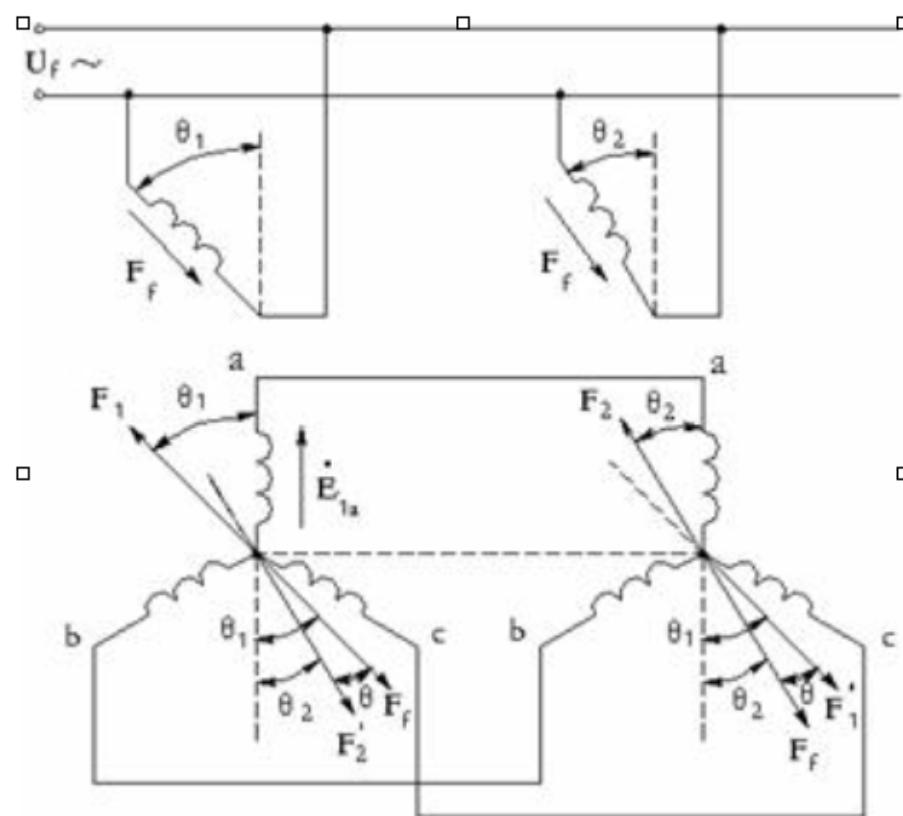


图7-35 力矩式自整角机接线图及磁动势图

其他控制微电子

在励磁绕组中通入单相交流电流时，两台自整角机的气隙中都将生成脉振磁场，其大小随时间按余弦规律变化。脉振磁场使整步绕组的各相绕组生成时间上同相位的感应电动势，电动势的大小取决于整步绕组中各相绕组的轴线与励磁绕组轴线之间的相对位置。当整步绕组中的某一相绕组轴线与其对应的励磁绕组轴线重合时，该相绕组中的感应电动势为最大，用 E_m 表示电动势的最大值。

其他控制微电子

设发送机整步绕组中的 A 相绕组轴线与其对应的励磁绕组轴线的夹角为 α_F ，接收机整步绕组中的 A 相绕组轴线与其对应的励磁绕组轴线的夹角为 α_J ，如图上图所示。则整步绕组中各相绕组的感应电动势有效值如下。

其他控制微电子

对发送机

$$E_{FA} = E_m \cos \theta_F$$

$$E_{FB} = E_m \cos(\theta_F - 120^\circ)$$

$$E_{FC} = E_m \cos(\theta_F - 240^\circ)$$

对接收机

$$E_{JA} = E_m \cos \theta_J$$

$$E_{JB} = E_m \cos(\theta_J - 120^\circ)$$

$$E_{JC} = E_m \cos(\theta_J - 240^\circ)$$

由于发送机与接收机各连接相的感应电动势在时间上是同相位的，可得各相回路的合成电动势为

$$\Delta E_A = E_{JA} - E_{FA} = E_m (\cos \theta_J - \cos \theta_F)$$

$$= 2E_m \sin \frac{\theta_F + \theta_J}{2} \sin \frac{\theta}{2}$$

$$\Delta E_B = E_{JB} - E_{FB} = 2E_m \sin \left(\frac{\theta_F + \theta_J}{2} - 120^\circ \right) \sin \frac{\theta}{2}$$

式中 $\theta = \theta_F - \theta_J$ 为发送机、接收机偏转角之差，称为失调角

其他控制微电机

当 $\theta_J \neq \theta_F$ ，即失调角 $\theta \neq 0$ 时，整步绕组中各相回路的合成电动势不为零，使各相回路中产生均衡电流。设整步绕组中的各相阻抗为 Z ，则各相回路的均衡电流有效值为

$$I_A = \frac{\Delta E_A}{2Z} = \frac{E_m}{Z} \sin \frac{\theta_F + \theta_J}{2} \sin \frac{\theta}{2}$$

$$I_B = \frac{\Delta E_B}{2Z} = \frac{E_m}{Z} \sin \left(\frac{\theta_F + \theta_J}{2} - 120^\circ \right) \sin \frac{\theta}{2}$$

$$I_C = \frac{\Delta E_C}{2Z} = \frac{E_m}{Z} \sin \left(\frac{\theta_F + \theta_J}{2} - 240^\circ \right) \sin \frac{\theta}{2}$$

其他控制微电机

由于 $\Delta J \neq \Delta F$ 时，整步绕组各相回路中存在均衡电流，带电的整步绕组在气隙磁场的作用下产生电磁转矩，电磁转矩作用于整步绕组而试图使定子旋转。只要发送机转子转过一个角度，接收机的转子就会在接收机本身生成的电磁转矩作用下转过一个相同的角度， $\Delta J = \Delta F$ ，从而实现了转角远距离再现。

实际上，由于存在摩擦转矩，当电磁转矩随失调角减小而减小到等于或小于摩擦转矩时，接收机的转子就停转了，也就是说，均衡电流未下降到零时接收机转子就停转了，说明接收机转子的偏转角与发送机转子的偏转角还有一定的偏差，即仍存在失调角，此时的失调角称为静态误差角。静态误差角越小，力矩式自整角机的精度越高。

旋转变压器

旋转变压器是自动装置中较常用的精密控制电机。当旋转变压器的定子绕组施加单相交流电时，其转子绕组输出的电压与转子转角成正弦余弦关系或线性关系等函数关系。旋转变压器结构与绕线式异步电动机类似，其定子、转子铁芯通常采用高磁导率的铁镍硅钢片冲叠而成，在定子铁芯和转子铁芯上分别冲有均匀分布的槽，里边分别安装有两个在空间上互相垂直的绕组，通常设计为2极，转子绕组经电刷和集电环引出。旋转变压器的种类很多，其中正余弦旋转变压器，线形旋转变压器较为常用。

旋转变压器的定子铁芯槽中装有两套完全相同的绕组D1D2和D3D4，但在空间上相差 90° ，每套绕组中有效匝数为 N_0 ，其中绕组D1D2为直轴绕组，绕组D3D4为交轴绕组。如下图所示。

正余弦旋转变压器的空载运行

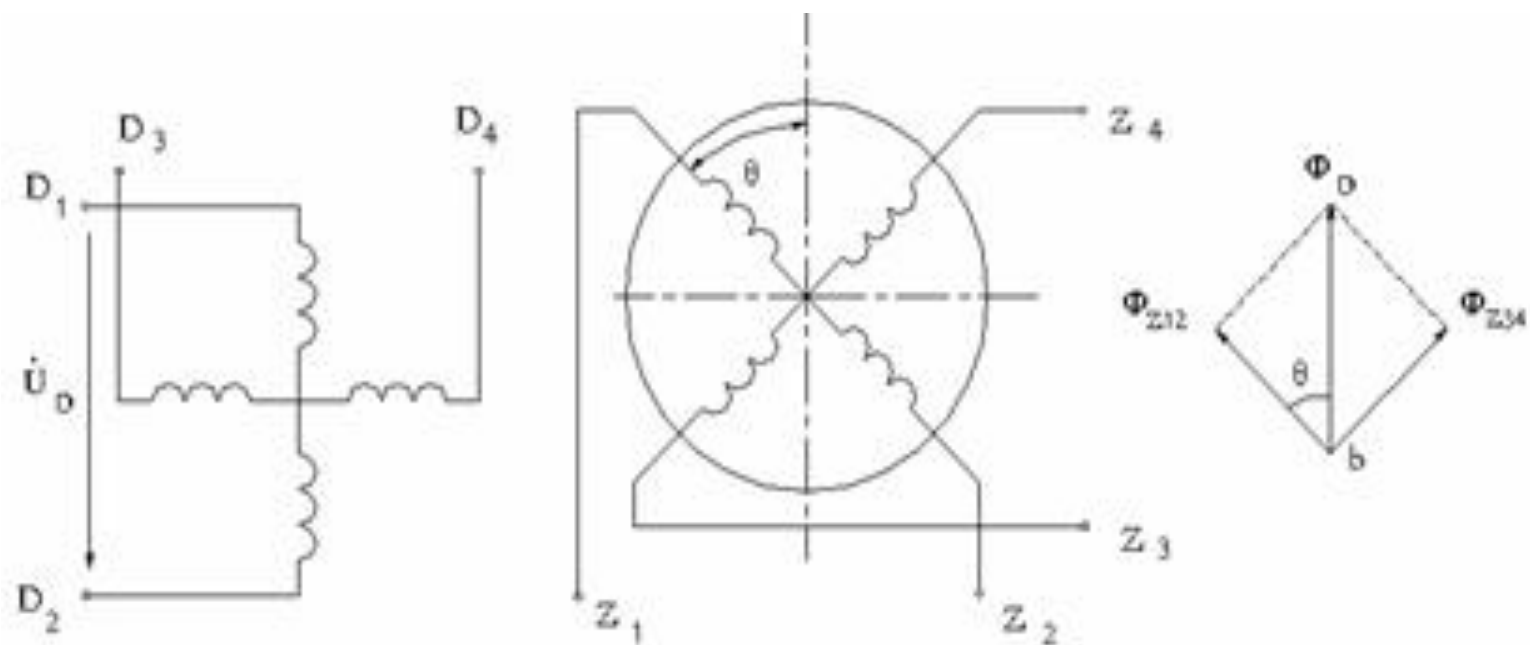


图7-39 正余弦旋转变压器的空载运行

正余弦旋转变压器的负载运行

正余弦旋转变压器在实际应用中，输出绕组都接有负载，如控制元件，放大器等，输出绕组有电流流过，从而产生磁动势，使气隙磁场产生畸变，从而使输出电压产生畸变，不再是转角的正、余弦函数关系。

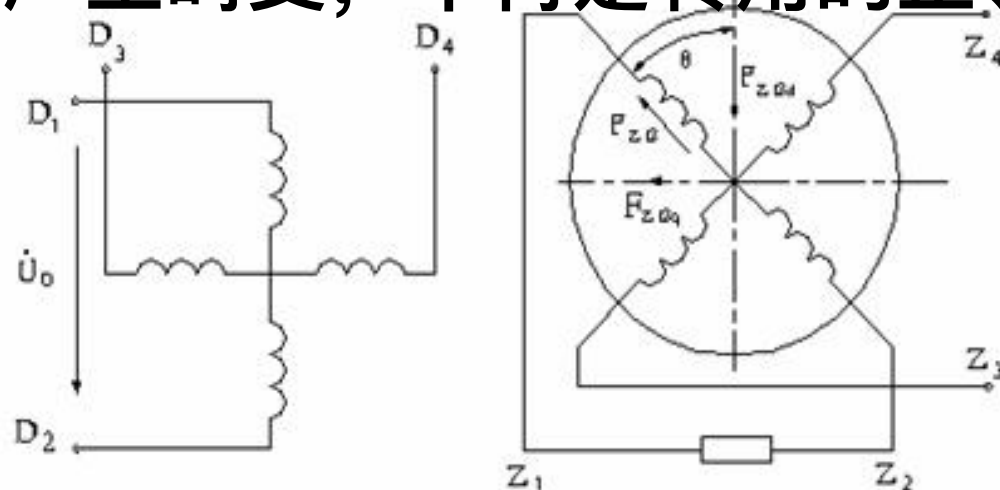


图 正余弦旋转变压器的负载运行

其他控制微电机

无刷直流电动机

1. 无刷直流电动机的结构原理

无刷直流电动机(**brushless DC motor**)是由电动机本体、转子位置传感器和电子开关线路三部分组成。其原理框图如下图所示。图中，直流电源通过开关电路向电动机定子绕组供电，位置传感器随时检测到转子所处的位置，并根据转子的位置信号来控制开关管的导通和截止，从而自动地控制哪些绕组通电，哪些绕组断电，实现了电子换向。

其他控制微电机

n

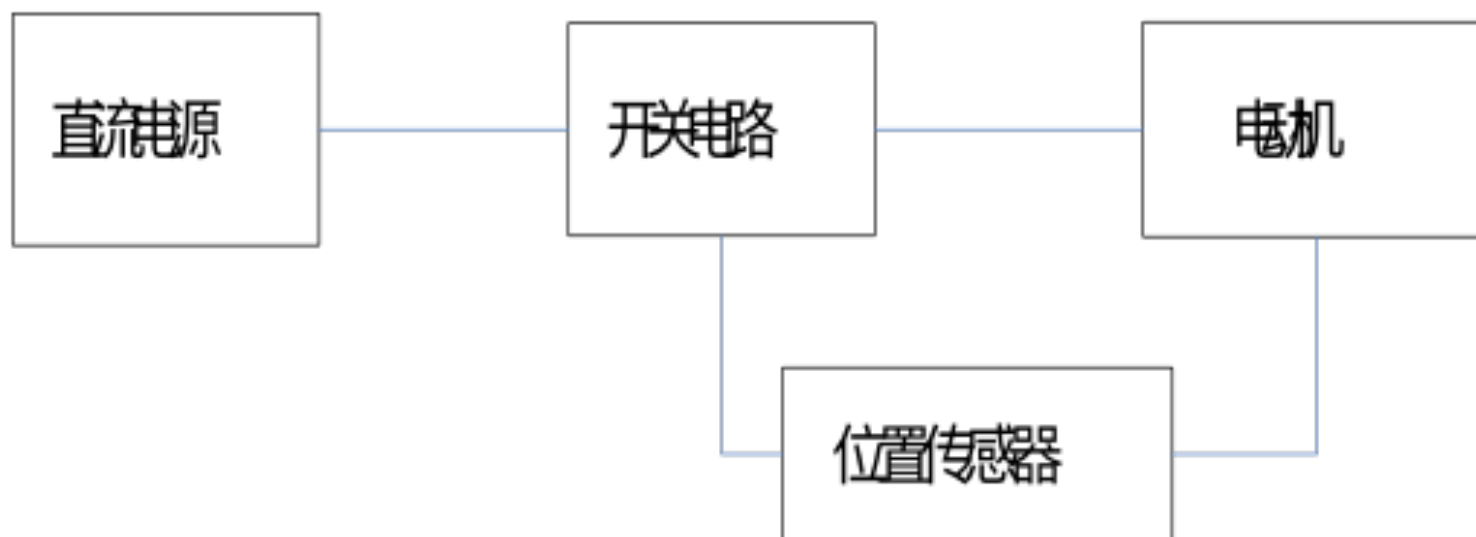


图 无刷直流电动机的原理框图

其他控制微电机

n

无刷直流电动机的基本结构如下图所示。无刷直流电动机的转子是由永磁材料制成的，是具有一定磁极对数的永磁体。

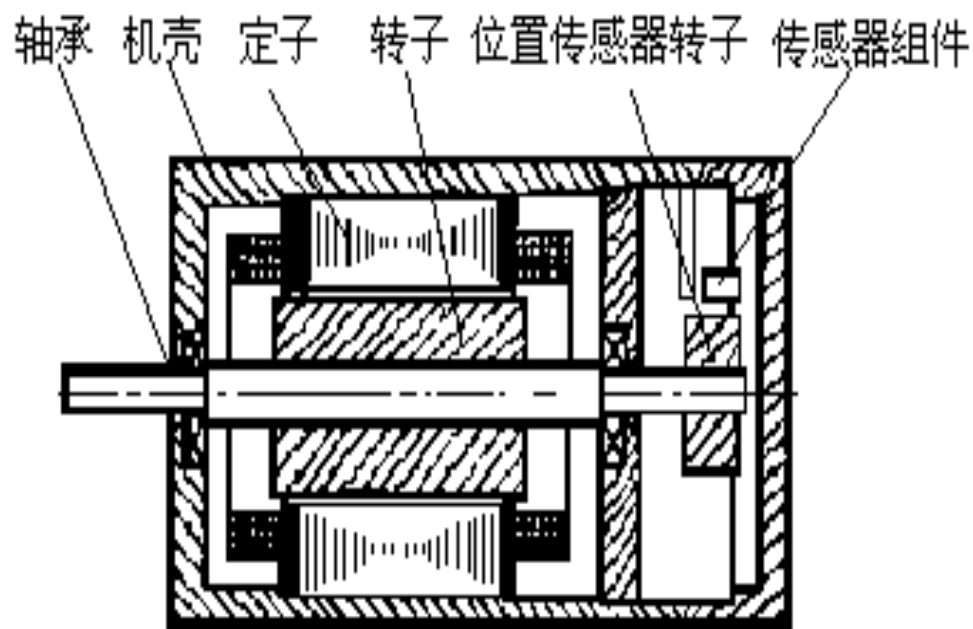


图 无刷直流电动机结构示意图

其他控制微电机

2 无刷直流电动机的工作原理

普通直流电动机的电枢在转子上，而定子产生固定不动的磁场。为了使直流电动机旋转，需要通过换向器和电刷不断改变电枢绕组中电流的方向，使两个磁场的方向始终保持相互垂直，从而产生恒定的转矩驱动电动机不断旋转。

其他控制微电机

无刷直流电动机为了去掉电刷，将电枢放到定子上去，而转子制成永磁体，这样的结构正好和普通直流电动机相反；然而，即使这样改变还不够，因为定子上的电枢通过直流电后，只能产生不变的磁场，电动机依然转不起来。为了使电动机转起来，必须使定子电枢各相绕组不断地换相通电，这样才能使定子磁场随着转子的位置在不断地变化，使定子磁场与转子永磁磁场始终保持左右的空间角，产生转矩推动转子旋转。

