

试 用 教 材

微 电 机

清 华 大 学 电 力 系

1973.1.

前言

一. 微电机的分类:

微电机一般是指由几分之一瓦到几百瓦功率范围的电机。根据其使用场合和功用可以划分为以下几类:

1. 控制用微电机:

① 伺服电动机: 能将输入的电气信号(控制电压)转换成机械轴上的输出转矩, 以完成自动控制系统的执行动作。

② 测速发电机: 将输入的机械转速转换成输出电压, 此电压与转速成严格的正比关系。还可用它作自动控制系统的加速或阻尼元件。

③ 自整角机: 用作同步联结系统的元件, 使两个或几个机械轴同步旋转。

④ 旋转变压器: 它的输出电压与转子转角成正比, 或成正弦、余弦函数关系。用在计算机求解装置或坐标变换装置中, 也可代替自整角机用于精密的同步联结系统。

⑤ 电机放大器: 用来把控制系统的控制信号的电压、功率放大以有效地控制伺服电动机去完成较大功率负载的控制动作。

2. 驱动用微电机:

① 微型电动机: 包括感应电动机、同步电动机、直流电动机、步进电动机、交直流通用换向器式电机。广泛用于小型机械驱动、自动记录仪表、数字控制机床以及各种生活用电气设备。

② 陀螺电机: 用于陀螺仪。

3. 电源用微电机:

① 微型发电机: 如汽车发电机、航空发电机等作自动装置中的独立电源用。

② 换流机: 包括直流升压机、直流变交流的变频器和交流变直流的变流机等用于专用的电源设备。

二. 微电机的特点:

从工作原理看, 微电机与普通电机大同小异, 但由于使用条件不同, 往往不是象普通电机那样以能量转换关系为主要研究

内容，而是针对特殊要求完成鉴别、伺服等职能，往往要求具有高精度、高灵敏度、高稳定可靠性（如高温、低温、高压、高湿、盐雾等条件下仍要正常工作）高结构强度（耐冲击振动）以及对无线电电子线路不产生干扰等特殊要求。对上述元件还要尺寸小重量轻。

针对用户特殊要求微电机生产工艺方面也有相应的特点，如精密加工、模拟用户工作条件试验等。

三. 电机制造专业为什么要学习这门课

从电机制造角度看，不单要制造中小型电机，也要制造几十万瓩的发电设备，同时也要制造各种品种的微型电机，才能全面地满足社会主义建设和国防工业发展的需要。仅在一机部系统所属的微电机厂就在近十几年来中从一两个厂发展到几十个厂，目前虽然微电机主要还是供应国防部门需要，但从长远来看，工农业和科学技术发展肯定要求微电机在品种和数量方面要以更高速度发展。我们电机专业学员要适应这种情况，就要学一点微电机的知识。

由于学员已经学过普通电机原理课程，而微电机在原理上与普通电机本质相同，只是在特性、分析方法等有一些特点。而微电机品种又非常多，因此只能选择几种介绍一下它们的原理、分析方法的特点。也可以说是掌握一般电机原理后对某一种微电机的特殊矛盾进行具体分析运用。这样一方面能扩大知识范围的作用，一方面也可以锻炼运用电机原理分析特殊问题的能力。

从工作原理的特殊性来看，驱动用微电机与电源用微电机与普通电机的差异更少一些，本课着重分析控制用电机的几个品种。

四. 控制用电机应用举例：

1. 自动加减速装置

原理性线路图如图1所示：

图1 转下页

其工作原理为，在互锁式旋转变压器的励磁绕组加上励磁电压后，将故进行加减速的量化为转角 α_1 和 α_2 ，分别将互锁式旋转变

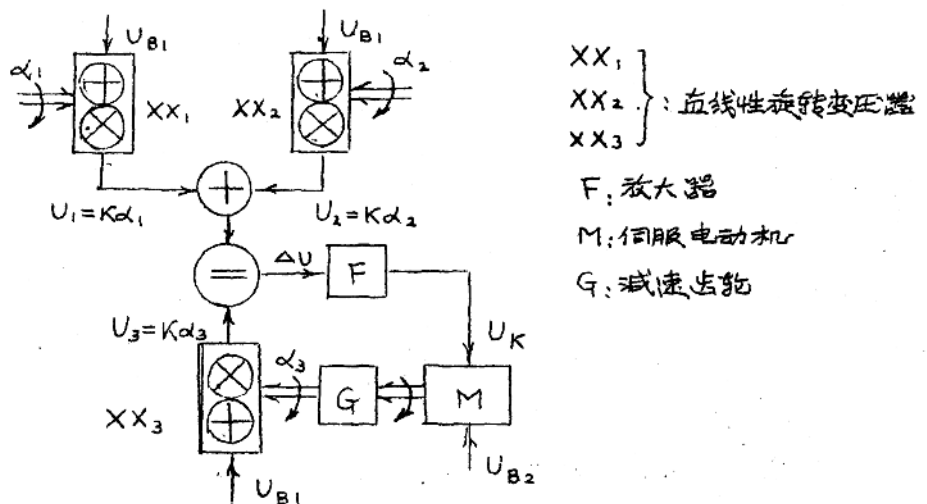


图 1. 自动加减运标装置原理线路

压器 XX_1 和 XX_2 的转子转动 α_1 和 α_2 角，则其输出电压分别为：

$$U_1 = K\alpha_1$$

$$U_2 = K\alpha_2$$

K 为恒值系数。此两电压叠加后与第三个旋转变压器的输出电压 U_3 进行比较，若 $U_1 + U_2 - U_3 = \Delta U$ ，则此电压差值 ΔU 即做为误差信号经放大器放大作为控制电压 U_K 接到伺服电动机上，伺服电动机即执行旋转动作，直到将第三个旋转变压器 XX_3 的转子转动 α_3 角，使其输出电压 $U_3 = K\alpha_3$ ，而与 $U_1 + U_2$ 平衡，即 $\Delta U = U_3 - (U_1 + U_2) = 0$ ，伺服电机停转，则

$$U_3 = U_1 + U_2$$

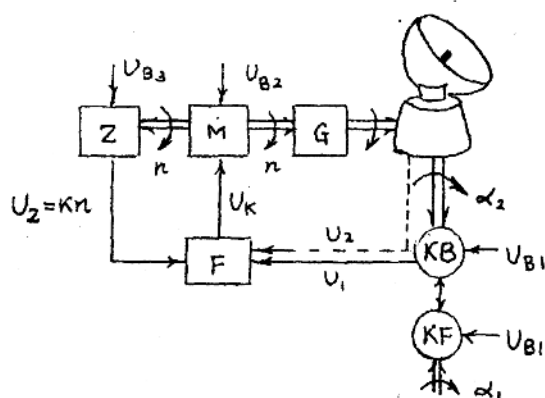
此时 $\alpha_3 = \alpha_1 + \alpha_2$ ，即为运标结果。

如 α_2 与 α_1 转向不同，可使 U_2 与 U_1 相位差 180° ，则可得减法运标结果 即 $U_1 - U_2 = U_3$

$$\alpha_3 = \alpha_1 - \alpha_2$$

2. 雷达天线控制系统

原理接线图如图 2 所示



KF: 自整角发送机

KB: 自整角接收机

F: 放大器

M: 伺服电动机

G: 减速齿轮

Z: 测速发电机

图 2. 天线控制系统原理线路

工作原理为：以手操纵自整角发送机 KF，使之转动 α_1 角，若自整角接收机 KB 与天线转轴联在一起此时还未转动，则由于此发送机与接收机转角不同，就会在接收机的输出绕组有电压 U_2 输出，此 U_2 的大小与两机转角差值有关。 U_2 经放大器 F 送至伺服电动机 M，使伺服电动机转动，带动天线轴及自整角接收机一起旋转，直到接收机转子转角 α_2 与自整角发送机转角 α_1 相等，即 $\alpha_1 - \alpha_2 = 0$ ，此时接收机输出电压 $U_2 = 0$ ，使放大后加到伺服电动机的控制电压 $U_K = 0$ ，电机停转，则系统已完成了天线轴与操作手柄转角相同的控制动作，也就是通过这种“同步随动系统”让笨重的天线“跟随”操作手柄一起“同步”旋转，以便使雷达迅速对准需要捕捉的飞机。

手动对准后，可利用天线接收机的讯号电压 U_2 去控制伺服电动机动作，则可实现天线自动跟踪的工作状态。

从以上两个例子可以定性地说明，欲使这种运动装置和控制系统准确地、快速地工作，对于系统中各类元件有特殊要求：

1. 作为量测、敏感、函数变化类型的元件，如自整角机、旋转变压器、测速发电机，主要要求它们的工作特性的精度高，如上述。

旋转变压器： $U_1 = K\alpha_1$

~ 4 ~

(13)

自整角机: $U_1 = K(\alpha_1 - \alpha_2)$

测速发电机: $U_2 = Kn$

这些特性要严格保证, 否则直接影响系统工作不精确。

2. 作为放大元件: 如电机放大机等, 要求放大时输出量与输入量成正比, 不要畸变, 甚至输入为零时还有输出。

3. 作为执行元件即伺服电机, 要求有控制电压就马上转, 控制电压去掉了马上停, 否则就失掉控制了。(如控制电压为零时, 电机还要转动就是失速的动作, 反之, 只要有一点控制电压, 电机就要启动旋转, 否则就是不灵敏, 有“死区”)

考虑实际运行条件, 不能由于卡车把装置拖在崎岖山路上就把元件颠簸坏了。在炮台上安装的电机也不能在发射炮弹的冲击下震坏电机。舰艇上的电机则工作在盐雾的环境中电动防潮防锈性能必须经得起运行考验。这些比普通电机的工作环境要复杂, 但必须保证工作可靠, 需要在制造过程中不仅考虑电磁原理的合理性, 而且要保证产品在可能遇到的恶劣环境中仍能正常运转。

第一章 交流伺服电动机

一. 结构

交流伺服电动机结构与普通异步电动机相似，定子开槽嵌入两相绕组，一相叫做励磁绕组，一相叫做控制绕组。两相绕组在空间分佈错开 90° 电角度，匝数一般不相同。但每相所占槽数还是对称的。

交流伺服电动机转子有几种类型：

1. 鼠笼式转子：与普通异步机一样。
2. 空心杯形转子，结构示意图如图 1-1 所示

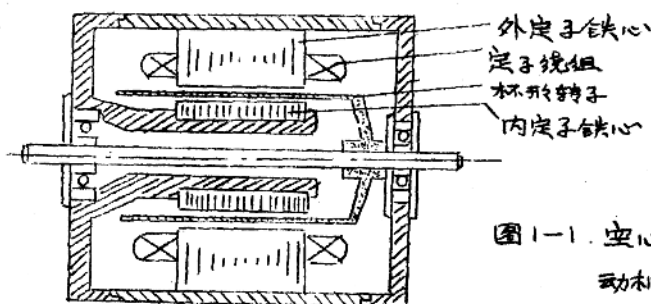


图 1-1 空心杯形转子伺服电动机结构示意图

相当于将鼠笼式转子的导电部分从槽中分离出来，做成杯形，而将导磁部分做成内定子，使外定子产生的磁通有较好的导磁磁路，但转子转动部分只是铝质空杯，重量轻，转动惯量小，因而使转动动作更加灵敏。

3. 铁杯形转子，在铁杯表面镀铜，用的较少。

二. 交流伺服电动机性能特点

从前面自动控制系统例子中说明，为了保证系统工作精度高，性能可靠，要求伺服电动机动作灵敏，有控制讯号电压就转，去掉控制讯号就停。可以用三个指标来表达：第一个是启动电压，即励磁电压固定不变，控制电压加到多少电机才开始转？（为了表明电机本身特性，此时电机不带负载）第二个是机电时间常数，即从加上额定控制电压的瞬间开始，经过多长时间电机才转到额定转速？（这一点反映启动转矩 M_k 与转子转动惯量 J 的比值大

小, $\frac{M_K}{J}$ 越大, 加控制讯号后动作越快) 第三个是原来已经转起来以后, 去掉控制电压后, 电机应该立即停下来, 不能“自行运转”, 这主要是靠加大转子电阻来做到, 并保证单相励磁通电时不产生旋转磁场。

另外为了把电机尺寸、重量减小, 往往采用高于工业频率的交流电源供电, 例如 400 周, 500 周, 800 周, 1000 周, 可以在相同的输出功率的条件下, 比 50 周的电机做得尺寸小些, 重量轻些。

围绕着这些要求, 这一章要介绍这种两相交流伺服电机为什么会转? 怎样分析交流伺服电机的特性? (包括转矩、转速关系、机电时间常数的计算, 防止“自行运转”转子电阻要加大多少?)

三. 交流伺服电动机的工作原理

在异步电动机原理中, 讲过了三相异步电动机为什么会转? 即定子三相绕组在空间位置上相互错开 120° 电角度, 通入三相对称电流后, 那么三相绕组的合成磁势是个以固定转速旋转而磁势幅值不变的旋转磁场。这个旋转磁场在转子绕组中产生电势、电流, 转子电流与气隙中磁场相互作用就可以产生转矩, 使转子旋转。在电动机运行状态转子转向是与旋转磁场方向相同的。

在转子转速较低时, 转子中感应电势的频率接近定子电源频率, 此时转子漏电抗较大, 功率因数较低, 随着转速增高, 转子的功率因数变大。

转子电势电流随转速增加而减少。

电磁力矩与气

隙磁通、转子电流和转子功率因数成正比, 因此转速增高, 转矩变化曲线如图 1-3 所示:

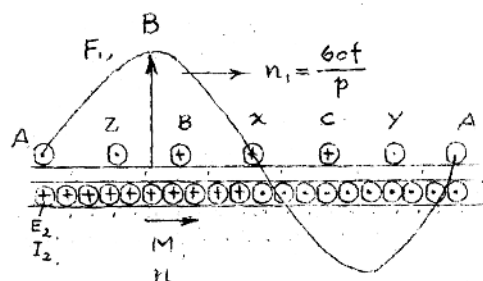


图 1-2 普通异步电机运行原理
(设转子绕组 $\cos \psi_2 = 1$)

当普通三相异步电动机运行中断开一相, (例如烧掉一相保险丝), 而电机负载不大时电机仍可继续旋转。但若电机停下来以后重新启动, 那么单相通电是不能启动的。因为此时只有单相电流, 电机定子只产生脉振的而不是旋转的磁场, 不能产生启动力矩。

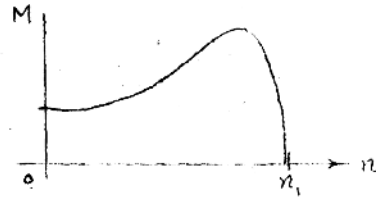


图1-3 普通异步电动机的力矩—转速曲线

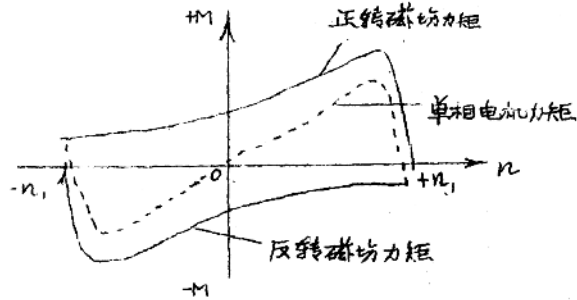
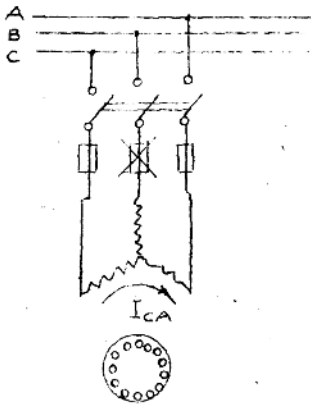


图1-4 普通三相异步电动机只剩单相运行时的特性

这种单相通电时, 定子脉振磁场可以看成是一半正转磁场与一半反转磁场的总和。正转的磁场分量企图使转子正方向转, 反转磁场企图让转子反转, 结果转子不转时, 两个转向相反的力矩相互抵消, 转子不产生启动力矩。但转子如果已经朝一个方向转了, 那么定子两个相反方向的磁场在转子上作用的力矩就不一样了。可以如图1-4所示, 能产生一总力矩让转子继续转下去。

对于交流伺服电动机而言, 如果两相通电后能够产生旋转磁场, 那么这个旋转磁场就与转子相作用让转子产生力矩, 使转子旋转并输出机械功率。因此问题就是两相绕组通电后怎样会产生旋转磁场?

三相电机产生旋转磁场的条件：三相绕组在空间位置差 120° ，三相电流在时间相位上也差 120° ，而且三相磁势幅值相同。

$$F_A = F_m \cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t = \frac{F_m}{2} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t \right) + \frac{F_m}{2} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x + \omega t \right)$$

$$F_B = F_m \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - 120^\circ \right) \cos (\omega t - 120^\circ) = \frac{F_m}{2} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t \right) + \frac{F_m}{2} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x + \omega t - 240^\circ \right)$$

$$F_C = F_m \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - 240^\circ \right) \cos (\omega t - 240^\circ) = \frac{F_m}{2} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t \right) + \frac{F_m}{2} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x + \omega t - 480^\circ \right)$$

$$\text{三相合成: } F_A + F_B + F_C = \frac{3F_m}{2} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t \right)$$

按照同样的分析办法，如果两相绕组在空间位置差 90° ，两相电流在时间上也差 90° ，而且两相磁势幅值相同，那么

$$F_B = F_m \cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \omega t = \frac{F_m}{2} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t \right) + \frac{F_m}{2} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x + \omega t \right)$$

$$F_K = F_m \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - 90^\circ \right) \cos (\omega t - 90^\circ) = \frac{F_m}{2} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t \right) + \frac{F_m}{2} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x + \omega t - 180^\circ \right)$$

两相合成磁势：

$$\begin{aligned} F_B + F_K &= F_m \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t \right) + \frac{F_m}{2} \left[\cos \left(\frac{\pi}{\tau} x + \omega t \right) - \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x + \omega t \right) \right] \\ &= F_m \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t \right) \end{aligned}$$

可见与三相异步电机磁势相似，只要两个绕组在空间位置差开 90° ，通电又在时间上差 90° ，而两相磁势幅值又相等，那么合成的磁势就是一个幅值不变的，转速为 $\frac{60f}{p}$ 的旋转磁场。此旋转磁场与转子绕组相互作用就会产生转矩，使这个两相伺服电动机带负载转动。（式中符号意义参阅异步电机原理）

伺服电机加两相相位差 90° 而使磁势幅值又相同的电压后，产生旋转磁场，这个旋转磁场如果用一个空间向量表示它，则这个空间向量以 $\frac{60f}{p}$ 的转速旋转，向量端点的轨迹是一个圆。这种旋转磁场我们特别称之为“圆旋转磁场”。

如此在适当的控制电压与励磁电压配合下产生旋转磁场使电动机旋转的问题解决了，那么在去掉了控制电压以后，电机还像普通异步电动机那样只剩单相还会继续旋转，做不到“去掉控制信号就停”的要求，怎么办？要加大转子电阻值。

根据普通异步电动机的原理，转子电阻增大后，使力矩曲线形状发生变化，如图 1-5 所示：

利用增大转子电阻的办法改变力矩特性，我们曾经在线绕转子异步电机中遇到过，靠在转子中串入电阻的办法可以增大启动力矩，降低启动电流。

在增大了转子电阻以后，如果再把一个三相异步电动机只接单相电源，会出现什么情况呢？我们发现，当转子电阻足够大时，如三相中断开一相，则电机

会停下来，因为这时候作用于转子的转矩与转速方向相反，起制动作用，而使电机从转动状态迅速停下来。如图 1-6 所示：

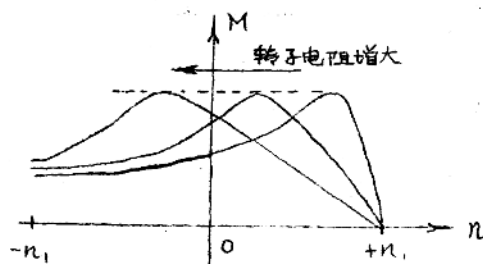


图 1-5 普通异步电机转子电阻值增大对力矩—转速特性的影响。

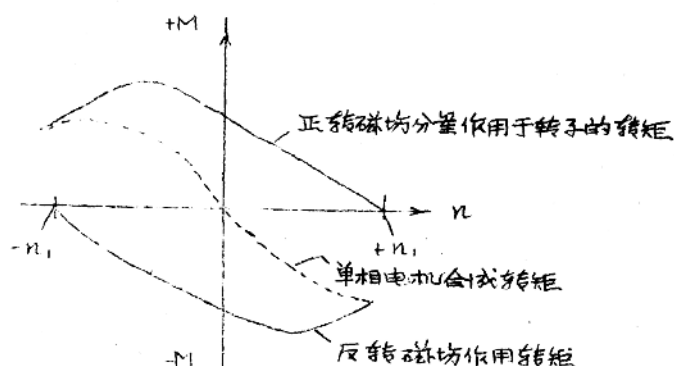


图 1-6 转子电阻足够大时的单相异步电机力矩特性。

这种特性正是两相伺服电动机所需要的。在去掉控制电压只剩励磁绕组通电时电机转子受制动力矩，达到“去掉控制电压就停”的要求。

为了转子电阻增大，作为鼠笼式转子当然是把鼠笼条与端环截面做小，采用电阻率较高的材料做导体，作为空心杯式转子，采用铝作原料，加工成薄壁杯形既可提高转子电阻值又能减轻转子重量及转动惯量，提高伺服机的快速性。

四. 两相交流伺服电动机特性的分析方法

1. 普通三相异步电动机是怎样分析计算工作特性的?

为了定量计算三相异步电动机在接以对称三相电源时的工作特性, 在异步电机原理中介绍了算值电路法, 可以用来计算异步电机的各种运行特性。如图 1-7 所示:

算值电路中各参数意义:

r_1 定子绕组每相电阻

X_1 定子绕组每相漏抗

r_2' 转子绕组每相电阻 (已折合到定子边, 相数也是三相了)

X_2' 转子绕组每相漏抗

r_m 反映铁损耗的算值电阻

X_m 铁心中能量储存相应的算值电抗

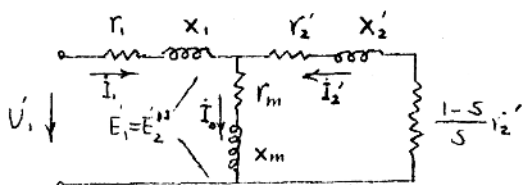


图 1-7 三相异步电动机算值电路

利用它可以计算异步电机的能量转换关系:

$$\text{定子输入功率 } P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1$$

$$\text{定子绕组铜耗 } p_{cu1} = m_1 I_1^2 r_1$$

$$\text{铁损耗 } p_{fe} = m_1 I_0^2 r_m$$

$$\text{由定子传到转子的电磁功率 } P_m = m_1 E_2' I_2' \cos \varphi_2$$

$$\text{或 } P_m = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s}$$

$$\text{转子铜耗 } p_{cu2} = m_1 I_2'^2 r_2'$$

$$\text{转子机械功率 } P_{mx} = P_m - p_{cu2}$$

$$= m_1 I_2'^2 \frac{1-s}{s} r_2'$$

这个机械功率再扣除机械损耗, 附加损耗即为转子输出给负载的机械功率。

利用这些关系可以求异步电机的电磁转矩:

$$\begin{aligned} M &= \frac{P_m}{9.81 \times 2\pi \frac{n_1}{60}} \\ &= \frac{m_1 U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{9.81 \times 2\pi \frac{n_1}{60} [(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s})^2 + (X_1 + c_1 X_2')^2]} \quad \text{公斤·米} \end{aligned}$$

$$\text{式中 } C_1 = 1 + \frac{r_1 + jx_1}{r_m + jx_m} \approx 1 + \frac{x_1}{x_m}$$

当已知电机参数，电压和转速时，就可以求此转速下的力矩。

2. 对于两相同步电动机，如果外加电压是对称的两相电压，即两相电压相位差 90° ，又能使两相产生同样幅值的磁势，那么将在电机中产生“圆旋转磁势”。这种条件计称为短的方法与三相异步电机相似，只不过相数 $m=2$ 。

3. 两相同步电动机在一般情况下励磁电压是固定的，控制电压时有时无，时大时小，这种情况下不是两相对称电压，应该怎样分析它的工作特性呢？这种情况下要利用“对称分量法”来进行分析计算。

以下先结合一种具体的控制线路来说明这种分析方法，接线图如下图1-8所示：

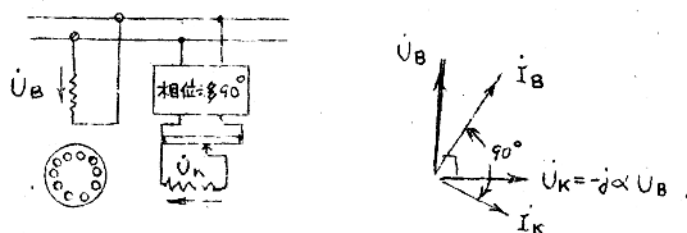
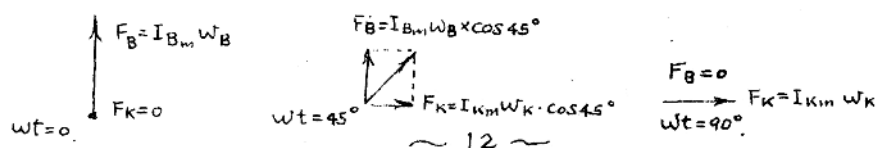


图1-8. 幅值控制线路及电压向量图

假设两相绕组匝数一样，外加电压保持控制电压落后于励磁电压 90° ，但大小不等，差了 α 倍，我们常把这个“ α ”叫做“讯号系数”，它是表示控制电压讯号强弱的。

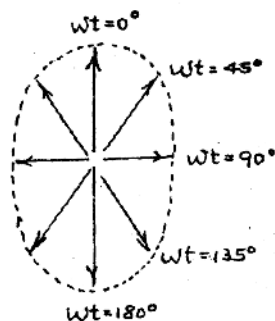
这样的两相电压加到电机两相绕组后，磁势是什么样的呢？由于两相绕组是一样的，它们的阻抗也相同，因此两相电流也是与电压成比例的，即 $I_K = j\alpha I_B$ ，这个电流分别流过两相绕组，组成磁势：

设 $\omega t = 0$ 时， $I_B = I_{Bm}$ ， $I_K = 0$ ，磁势在B绕组轴线方向。



如此逐点画出，可见两相总磁场还是旋转的，但一边旋转一边幅值在变，总磁场用空间向量画出，则其端点轨迹是个椭圆。

如控制电压 $U_K=0$ ，则只剩励磁相有电压、电流，其磁场将是脉振的，向量端点轨迹是个来回变化的直线。控制电压若按对称条件，即相位差 90° ，幅值与励磁电压相等，则总磁场的向量端点轨迹还是一个圆。可以看成一般情况是椭圆，而圆和直线为其特例。



可以按照前面分析脉振磁场的概念，把一相脉振磁场看成是半个正向旋转磁场与半个反向旋转磁场的总和：

$$F_B = F_{Bm} \cos \frac{\pi}{\tau} x \cdot \cos \omega t = \frac{F_{Bm}}{2} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t \right) + \frac{F_{Bm}}{2} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x + \omega t \right)$$

$$F_K = \alpha F_{Bm} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - 90^\circ \right) \cos (\omega t - 90^\circ) = \frac{\alpha F_{Bm}}{2} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t \right) + \frac{\alpha F_{Bm}}{2} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x + \omega t - 180^\circ \right)$$

总和磁场：

$$F_B + F_K = \frac{(1+\alpha)}{2} F_{Bm} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t \right) + \frac{1-\alpha}{2} F_{Bm} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x + \omega t \right)$$

即总和磁场也存在两个分量；一个是幅值为 $\frac{1+\alpha}{2} F_{Bm}$ 的正向旋转磁场分量，一个是幅值为 $\frac{1-\alpha}{2} F_{Bm}$ 的反向旋转磁场分量。

与此对应，两相电流也可以分成一个幅值为 $\frac{1+\alpha}{2} I_B$ 的正向转的分量，或叫做正序分量，一个是幅值为 $\frac{1-\alpha}{2} I_B$ 的反转分量或叫做负序分量。

与此对应，两相电压也可以分为一个幅值为 $\frac{1+\alpha}{2} U_B$ 的正序分量，一个幅值为 $\frac{1-\alpha}{2} U_B$ 的负序分量。

正序

磁场: $\frac{1+\alpha}{2} F_{Bm} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \omega t \right)$

正转

电流: $\begin{cases} I_{B1} = \frac{1+\alpha}{2} I_B \\ I_{K1} = -j I_{B1} \end{cases}$

电压: $\begin{cases} U_{B1} = \frac{1+\alpha}{2} U_B \\ U_{K1} = -j U_{B1} \end{cases}$

负序

$\frac{1-\alpha}{2} F_{Bm} \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x + \omega t \right)$

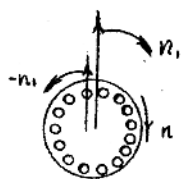
反转

$\begin{cases} I_{B2} = \frac{1-\alpha}{2} I_B \\ I_{K2} = j I_{B2} \end{cases}$

$\begin{cases} U_{B2} = \frac{1-\alpha}{2} U_B \\ U_{K2} = j U_{B2} \end{cases}$

物理意义上可以这样理解：电压分成正序分量和负序分量，正序分量是两相电压大小相同，控制电压落后于励磁电压 90° ，这个电压分量加到电机上，产生电流也是相似的，即两相电流大小相同，控制电流落后于励磁电流 90° ，产生正转的园旋转磁场，转向是从B相绕组轴线转到K相绕组轴线的方向。而负序电压分量，是控制电压领先于励磁电压 90° ，电流也是控制相电流领先于励磁相电流 90° 。在电机中产生反转磁场，即从K相绕组轴线转到B相绕组轴线的方向。

有了电压的正序分量和负序分量，可以看成伺服电动机的电磁功率关系都是这两个分量分别作用的总和。正序电压分量加到电动机上的电磁过程与普通三相异步电动机完全一样，可以利用等值电路计算。负序电压分量加到电动机定子绕组以后，产生负序电流分量，组成的园旋转磁场是反向旋转的，这时如果转子按照正序磁场方向旋转，那么转子相对于这个反转磁场分量而言滑差是很大的。

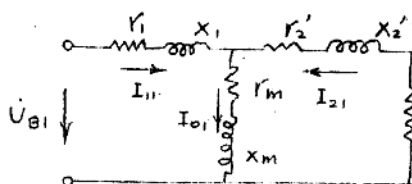


$$\text{转子对正转磁场的滑差 } S_1 = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

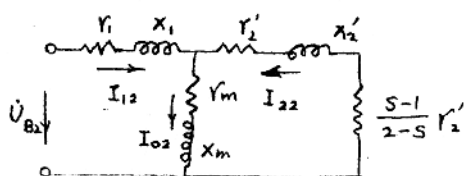
$$\begin{aligned} \text{转子对反转磁场的滑差 } S_2 &= \frac{-n_1 - n}{-n_1} = \frac{n_1 + n}{n_1} \\ &= \frac{2n_1 - (n_1 - n)}{n_1} \\ &= 2 - S_1 \end{aligned}$$

转子对反转磁场而言滑差较大，也就是转子磁条中切割这个反转磁场时感生电势、电流频率较高，转子绕组中损耗较大。分析时也仍然可以用那个等值电路，但实际电机既然只有一个，转速也只有一个，因此考虑负序电压分量加到电动机时，要用负序分量的滑差代替原来那个对正序分量的滑差。在等值电路中有这一点区别。

对正序分量的等值电路



对负序分量的等值电路





与正序电压 $\dot{U}_{B1}$ 之比称为正序阻抗 Z_1 ，负序电压 $\dot{U}_{B2}$ 与负序电流 $\dot{I}_{12}$ 之比称为负序阻抗 Z_2 。

$$Z_1 = \frac{\dot{U}_{B1}}{\dot{I}_{11}}$$

$$Z_2 = \frac{\dot{U}_{B2}}{\dot{I}_{12}}$$

功率关系如下：

	正序	负序
定子输入功率	$P_{11} = m_1 U_{B1} I_{11} \cos \varphi_{11}$	$P_{12} = m_1 U_{B2} I_{12} \cos \varphi_{12}$
定子铜耗	$P_{Cu1} = m_1 I_{11}^2 r_1$	$P_{Cu12} = m_1 I_{12}^2 r_1$
铁耗	$P_{Fe1} = m_1 I_{01}^2 r_m$	$P_{Fe2} = m_1 I_{02}^2 r_m$
电磁功率	$P_{M1} = m_1 I_{21}^2 \frac{r_2'}{s}$	$P_{M2} = m_1 I_{22}^2 \frac{r_2'}{2-s}$
机械功率	$P_{MX1} = m_1 I_{21}^2 \frac{1-s}{s} r_2'$	$P_{MX2} = m_1 I_{22}^2 \frac{s-1}{2-s} r_2'$
转子铜耗	$P_{Cu21} = m_1 I_{21}^2 r_2'$	$P_{Cu22} = m_1 I_{22}^2 r_2'$

当转子在 $0 < n < n_1$ 范围内转动时，即 $1 > s > 0$ ，对负序分量而言，由定子传给转子的电磁功率 $P_{M2} > 0$ ，意即功率是从定子传到转子，但它比转子铜耗 P_{Cu22} 小，那么转子铜耗所损耗的功率是从哪里来的呢？是从转子机械功率 P_{MX2} 得来的，当 $1 > s > 0$ 时

$$P_{MX2} = m_1 I_{22}^2 \frac{s-1}{2-s} r_2' < 0,$$

机械功率 $P_{MX2} < 0$ 的意思是，对于这个负序分量而言，转子不但不向外送出机械功率，反而要从正序送出的机械功率中挖出一部分来供给转子绕组电阻铜损耗，要多损耗一些机械功率倒过来变成电功率消耗在转子中，因此当伺服电动机接入不对称的两相电压时旋转磁场是个椭圆磁场，相当于圆磁场附加上一个反转的磁场分量，此反转分量对转子起制动作用，增大损耗，降低效率。

总的电磁力矩：

$$M = \frac{P_{M1}}{2\pi \frac{n_1}{60}} + \frac{P_{M2}}{2\pi \frac{-n_1}{60}} = \frac{m_1 U_{B1}^2 \frac{r_2'}{s}}{9.81 \times 2\pi \frac{n_1}{60} \left[\left(r_1 + c_1 \frac{r_1'}{s} \right)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2 \right]} - \frac{m_1 U_{B2}^2 \frac{r_2'}{2-s}}{9.81 \times 2\pi \frac{n_1}{60} \left[\left(r_1 + c_1 \frac{r_1'}{2-s} \right)^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2 \right]}$$

用前面 $\begin{cases} U_{B1} = \frac{1+\alpha}{2} U_B \\ U_{B2} = \frac{1-\alpha}{2} U_B \end{cases}$ 代入得

$$M = \frac{m_1 U_B^2}{9.81 \times 2\pi \frac{n_1}{60}} \left[\frac{\left(\frac{1+\alpha}{2}\right)^2 \frac{r_2'}{s}}{(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{s})^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2} - \frac{\left(\frac{1-\alpha}{2}\right)^2 \frac{r_2'}{2-s}}{(r_1 + c_1 \frac{r_2'}{2-s})^2 + (x_1 + c_1 x_2')^2} \right]$$

已知电机参数外加电压和转子转速后，可求出力矩大小，因而可以画出电动机的转矩-转速曲线。如图1-9所示。

4. 常用的幅值相位控制线

路的分析方法

① 上述的移相 90° 的电路比较复杂，因为要保证负载大小变化、电流变化时仍保持移相 90° 是不容易的，实际上用的最多的是用一只电容串在励磁绕组中使励磁绕组端电压与控制绕组端电压相位差 90° 。如图

1-10所示：

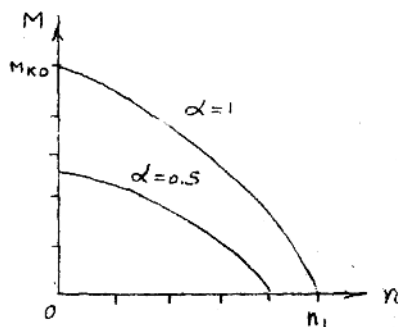


图1-9. 幅值控制时机机械特性

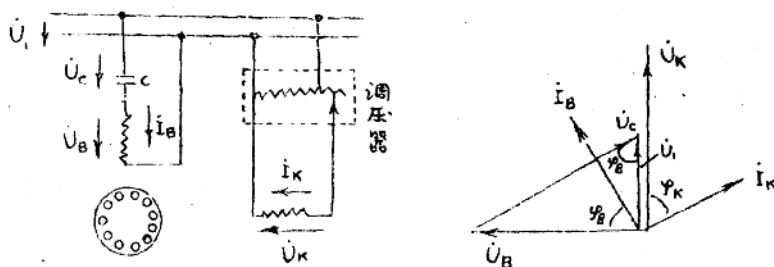


图1-10. 幅值相位控制线路及向量图

按照这种线路，控制电压 $\dot{U}_K$ 与电源电压 $\dot{U}_1$ 同相，而欲使励磁绕组端电压 $\dot{U}_B$ 与控制电压 $\dot{U}_K$ 差 90° ，须选择适当的电容 C ，其容抗为 X_C ，

电容端电压 $\dot{U}_C = \dot{I}_B \cdot X_C$

绕组端电压 $\dot{U}_B = \dot{I}_B Z_B$

欲使 $\dot{U}_B$ 与 $\dot{U}_K$ 差 90° ，也就是与 $\dot{U}_1$ 差 90° ，即由 $\dot{U}_B$ ， $\dot{U}_1$ 和 $\dot{U}_C$ 三