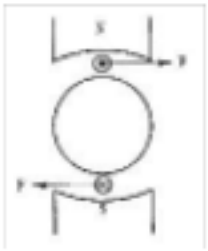


直流测速发电机
1. 工作原理： 直流发电机的工作是基于电磁感应定律， 即： 运动导体切割磁力线， 在导体中产生切割电势； 或者说匝链线圈的磁通发生变化， 在线圈中发生感应电势。
2. 结构：各种型号直流电机的基本结构都是一样的， 这里简述小型直流电机结构的主要部分。直流电机总体结构可以分成两大部分： 静止部分（称为定子）和旋转部分（称为转子 ）。 定子和转子之间存在间隙（称为空气隙 ）。 定子由定子铁心、 励磁绕组、 机壳、 端盖和电刷装置等组成。 转子由电枢铁心、 电枢绕组、 换向器、 轴等组成。一般小型电机的轴是通过轴承支撑在端盖上的。
3. 换向器：换向器是由许多换向片（铜片）叠装而成的。 换向片之间用塑料或云母绝缘， 各换向片和元件相连。 常用的换向器有金属套筒式换向器与塑料换向器。在直流电机中， 电刷和换向器的作用是将电枢绕组中的交变电势转换成电刷间的直流电势。
4. 电枢反应：对称负载时， <u>电枢磁动势</u> 对主极磁场 <u>基波</u> 产生的影响，这种现象称为电枢反应。 <div><div>当 <u>电枢绕组</u> 中没有电流通过时，由磁极所形成的磁场称为主磁场，近似按正弦规律分布。当电枢绕组中有电流通过时， 绕组本身产生一个磁场，称为电枢磁场。电枢磁场对主磁场的作用将使主磁场发生畸变，产生电枢反应；</div></div>
5. 误差及减小方法： 温度影响 可在励磁回路中串联负联温度系数的热敏电阻 并联网络； 电枢反应影响 在直流测速发电机的技术条件中给出最大线性工作转速 n 和最小负载电阻值。在使用时， r 不得超过最大线性工作 r ，所接负载 R 不得小于最小负载 R ，以保证线性误差在限定的范围内； 延迟换向去磁 对于小容量的测速级一般才去限制转速的措施来削弱延迟换向去

磁作用，即规定了最高工作转速；纹波无槽电枢直流电机可以大大减少因齿槽效应而引起的输出电压纹波幅值；电刷接触压降 常常采用接触压降较小的银—石墨电刷。在高精度的直流测速发电机中还采用铜电刷，并在它与换向器的表层上镀上银层，使换向器不易磨损。
6. 应用： 作为系统的阻尼元件 对旋转机械作恒速控制

直流伺服电动机
1.工作原理：直流电动机的基本结构和直流测速发电机相同， 所不同的是电动机的输入为电压信号， 输出为转速信号。 下面分析直流电动机的工作原理。



为简明起见， 仍采用具有 4 个槽的两极电机模型，如图 2-3 。 在 A、 B 两电刷间加直流电压时， 电流便从 B 刷流入， A 刷流出。 N 极下导体中的电流流出纸面， 用表示； S 极下导体中的电流流入纸面， 用表示， 见图 3 - 1 。根据电磁学基本知识可知， 载流导体在磁场中要受到电磁力的作用。如果导体在磁场中的长度为 l ，其中流过的电流为 i ， 导体所在处的磁通密度为 B ， 那末导体受到的电磁力的值为 $F = Bli$ （3 - 1）式中， F 的单位为牛顿 (N)； B 的单位为韦伯 / 米 2 (Wb/m²)； l 的单位为米 (m)； i 的单位为安培 (A)；力 F 的方向用左手定则来确定。

据此， 作出图 3 - 1 中 N、 S 极下各根导体所受电磁力的方向， 如图中箭头所示。 电磁力对转轴形成顺时针方向的转矩， 驱动转子而使其旋转。 由于每个磁极下元件中电流方向不变， 故此转矩方向恒定， 称为直流电动机的电磁转矩。 如果电机轴上带有负载， 它便输出机械能， 可见直流电动机是一种将电能转换成机械能的电气装置。

我们用同一个模型， 既分析了直流发电机的工作原理， 又分析了直流电动机的工作原理。可见直流电机是可逆的， 它根据不同的外界

条件而处于不同的运行状态。 当外力作用使其旋转， 输入机械能时， 电机处于发电状态， 输出电能； 当在电刷两端施加电压输入电能时， 电机处于电动机状态， 带动负载旋转输出机械能。 事实上， 发电机、 电动机中所发生的物理现象在本质上是是一致的。下面的分析将进一步证明这一点。

2. 电磁转矩和转矩平衡方程式：直流电动机所产生的电磁转矩作为驱动转矩使电动机旋转。 当电动机带着负载匀速旋转时， 其输出转矩必定与负载转矩相等， 但电动机的输出转矩是否就是电磁转矩呢？ 不是的。 因为电机本身的机械摩擦（例如轴承的摩擦、 电刷和换向器的摩擦等）和电枢铁心中的涡流、 磁滞损耗都要引起阻转矩， 此阻转矩用 T_0 表示。 这样， 电动机的输出转矩 T_2 便等于电磁转矩 T 减去电机本身的阻转矩 T_0 。 所以， 当电机克服负载阻转矩 T_L 匀速旋转时， 则 $T_2 = T - T_0 = T_L$ （3 - 5）式（3 - 5）表明， 当电机稳态运行时， 其输出转矩的大小由负载阻转矩决定。 或者说， 当输出转矩等于负载阻转矩时， 电机达到匀速旋转的稳定状态。 式（3 - 5）称为电动机的稳态转矩平衡方程式。 把电机本身的阻转矩和负载的阻转矩合在一起叫做总阻转矩 T_s ， 即 $T_s = T_0 + T_L$ 则转矩平衡方程式可写成 $T = T_s$ （3 - 6） 它表示在稳态运行时， 电动机的电磁转矩和电动机轴上的总阻转矩相互平衡。 实际上， 电动机经常运行在转速变化的情况下， 例如启动、 停转或反转等， 因此必须讨论转速改变时的转矩平衡关系。

当电机的转速改变时， 由于电机及负载具有转动惯量， 将产生惯性转矩 T_j ，

$$T_j = J \frac{d\Omega}{dt}$$

其中， J 是负载和电动机转动部分的转动惯量；

$\frac{d\Omega}{dt}$ 是电动机的角速度； $\frac{d\Omega}{dt}$ 是电动机的角加

速度。 这时， 电动机轴上的转矩平衡方程

式为 $T_2 - T_L = T_j = J \frac{d\Omega}{dt}$

3. 机械特性

4. 直流力矩电动机：直流力矩电动机就是为满足类似上述这种低转速、 大转矩负载的需要而设计制造的电动机； 调速方法： 调压 调

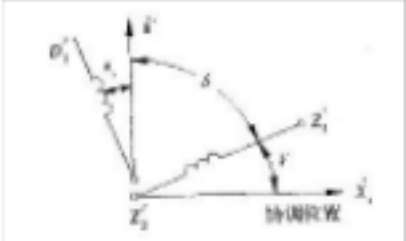
磁 调电阻

5.各种转矩定义要知道，计算题把课后习题

做了就行了。

自整角机

1. 原理： (1) ZKF 的转子绕组产生的励磁磁场是一个脉振磁场，它在发送机定子绕组中感应变压器电势。定子各相电势时间上同相位，其有效值与定、转子间的相对位置有关。(2) ZKF 定子合成磁场的轴线与转子励磁磁场的轴线重合，但方向恰好相反。(3) ZKF 和 ZKB 的定子三相



绕 组对应联接，两机定子绕组的相电流大小相等、方向相反，因而两机定子合成磁场相对自己定子绕组位置的方向

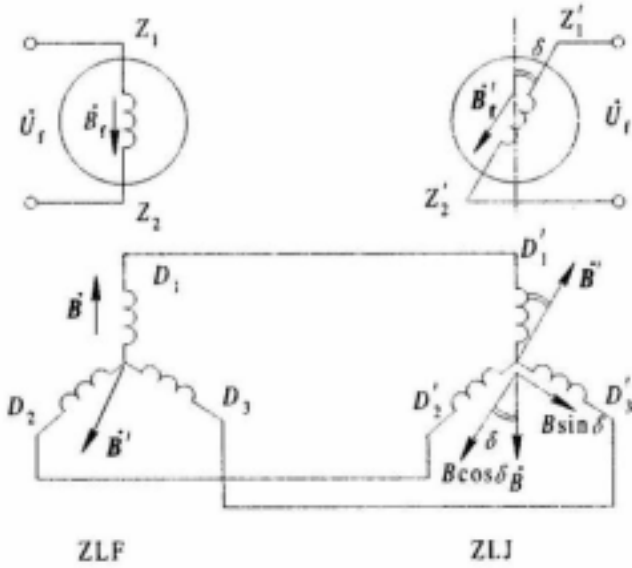
也应相反。(4) ZKB 的输出电势的有效值 $E_z = E_{2ma} \times \sin$ ，其中 叫失调角。

失调角 $= 90^\circ - \delta$ ， δ 是实际 ZKB 转子绕组轴线 (从 Z_2 到 Z_1 方向偏移(超前)协调位置 (X 方向)的角度(取正号)(图 5 - 20 所示)。协调位置为输出电势

等于零的位置。在失调角比较小时， $U_z = U_{2ma} \times \sin$ ，这里 的单位取弧度 (rad)。

2. 力矩式自整角机

力矩式自整角机的工作原理：ZLF-ZLJ 的工作原理如图 5 - 26 所示。图中这一对力矩式自整角机的结



构参数、尺寸等完全一样。我们假定图 5 - 26 中 ZLF 的转子励磁绕组轴线位置，是当两机加励磁后，由原来

与 ZLJ 转子轴线相同的位置人为地逆

时针方向旋转 δ 角的位置，当忽略磁

路饱和时，我们可分别讨论 ZLF 和 ZLJ 单独励磁的作用，然后进行迭加。

(1) 只有 ZLF 励磁绕组接通电源，将接收机 ZLJ 励磁绕组开路。此时所发生的情况与控制式运行类似，即发送机转子励磁磁通在发送机定子绕组中感应电势，因而在两机定子绕组回路中引起电流，三相电流在发送机的气隙中产生与发送机方向相反的合成磁密，而在接收机气隙中形成与发送机的对

应方向相反的合成磁密，这里仍用来表示，如图 5 - 26 所示。(2) 只将 ZLJ 单独加励磁，发送机励磁绕组开路。同理，此时接收机中的情况与上

述发送机中的情况一样，反之发送机中的情况又与上述接收机中的情况一样。亦即接收机定子三相电流产生的合成磁密与接收机的方向相反，而发送机定子合成磁密与接收机本身的合

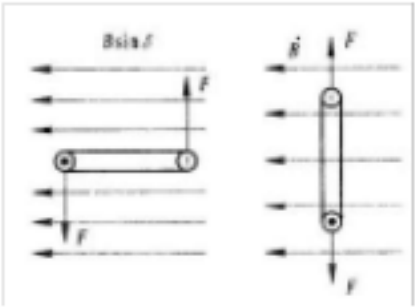
成磁密对应方向相反。如图 5 - 26 中的 ZLF 所示。(3) 力矩式自整角机

实际运行时，发送机和接收机应同时励磁，则发送机和接收机定子绕组同时产生磁密，利用叠加原理可将它们合成。为了分析方便，把接收机中由 ZLF 励磁产生的磁密沿方向分解成两

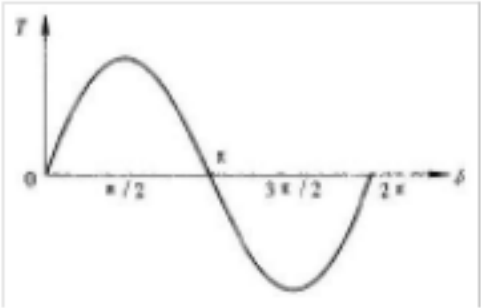
个分量：一个分量 和转子绕组轴线一致，其长度用 $B \cos$ 表示。这样在转子绕组轴线方向上，定子合

成磁密矢量的长度为 $B - B \cos$ 。因为据前设定 $B = B$ ，所以 $B_d = B - B \cos = B(1 - \cos)$ ，的实际方向与接收机励磁磁密相反，即起去磁作用。当然，它不会使 ZLJ 的转子旋转。

另一个分量和转子绕组轴线垂直，其长度用 $B \sin$ 表示，即 $B_q = B \sin$ 。



5.5.2



的失调角和协调位置

力矩式自整角机的接收机 ZLJ 转子在失调时能产生转矩 T 来促使转子和发送机 ZLF 转子协调，这个转矩是由电磁作用产生的，我们称之为整步转矩。由于磁密 $B_q = B \sin$ 起了关键作用，故整步转矩与 \sin 成正比，即

$T = K_B \sin$ (5 - 15) 因为 $= 0^\circ$ 时， $T = 0$ ，所以当 ZLJ 的转子受到的转矩

为零时，我们称自整角发送机与接收机处于协调位置 (用 $X_t L$ 相量表示)；当

$0^\circ < T < 0$ 时称自整角发送机与接收机失调。角就称为失调角。图 5 -

28 为整步转矩与失调角的关系图。当失调角很小时，可以证明，转矩与产生它的磁场成正比，再考虑到数学上

\sin (单位取 rad)，则认为： $T = K_B \sin = K_B$ (5 - 16) 类似于控制式自整角机的比电压，当失调角为 1° (即

0.017453 rad) 时，力矩式自整角机所具有的整步转矩称为比整步转矩，用 T 表示，即 $T = K_B \sin 1^\circ = 0.017$

$453 K_B$

旋转变压器

1. 原理：从电机原理来看，旋转变压器又是一种能旋转的变压器。这种变压器的原、副边绕组分别装在定、转子上。原、副边绕组之间的电磁耦合程度由转子的转角决定，故转子绕组的输出电压大小及相位必然与转子的

转角有关。按旋转变压器的输出电压和转子转角间的函数关系，旋转变压器可分为正余弦旋转变压器 (代号为

XZ)、 线性旋转变压器 （代号为 XX) 以

及比例式旋转变压器 （代号为 XL)。其

中， 正余弦旋转变压器的输出电压与
转子转角成正余弦函数关系 ； 线性旋

转变压器的输出电压与转子转角在一

定转角范围内成正比 ； 比例式旋转变

压器在结构上增加了一个锁定转子位

置的装置。这些旋转变压器的用途主
要是用来进行坐标变换、 三角函数计

算和数据传输、 将旋转角度转换成信

号电压， 等等。 根据数据传输在系统

中的具体用途 ， 旋转变压器又可分为

旋变发送机 (代号为 XF)、 旋变差动发

送机 (代号为 XC) 和旋变变压器 （代号

为 XB)。 其实， 这里数据传输的旋转

变压器在系统中的作用与相应的自整

角机的作用是相同的。

2. 补偿：【1】副边补偿的正余弦旋转变

压器；这些旋转变压器的用途主要是

用来进行坐标变换、 三角函数计算和

数据传输、 将旋转角度转换成信号电

压， 等等。 根据数据传输在系统中的

具体用途 ， 旋转变压器又可分为旋变

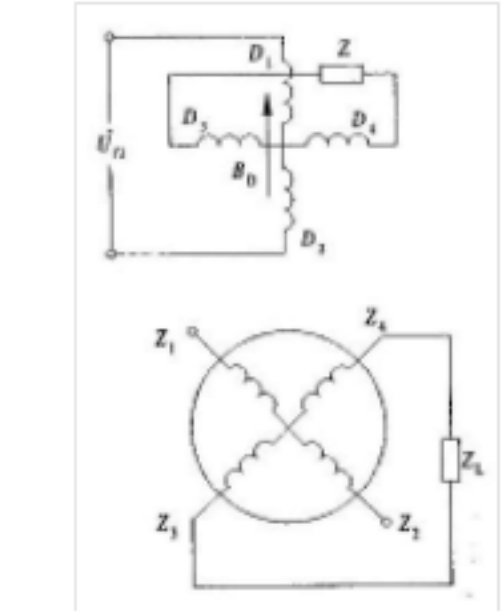
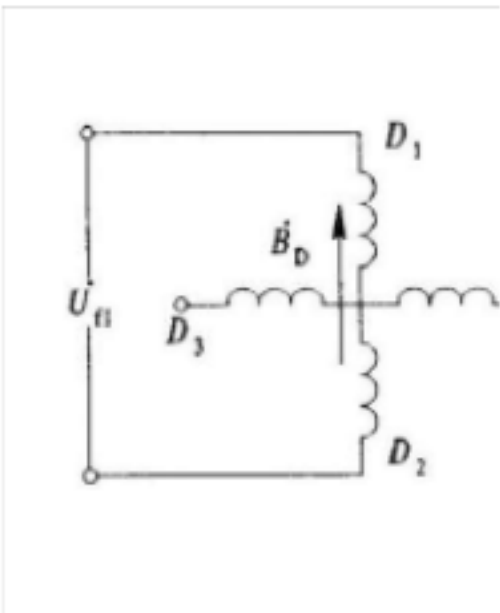
发送机 (代号为 XF)、 旋变差动发送机

(代号为 XC) 和旋变变压器 （代号为 XB)。

其实， 这里数据传输的旋转变压器在

系统中的作用与相应的自整角机的作

用 是 相 同 的 。



【2】原边补偿的正余弦旋转变压器； 用原边

补偿的方法也可以消除交轴磁通的影响。 接

线图如图 6 - 6 所示， 此时定子 D1-D2 励磁

绕组接通交流电压 ， 定子交轴绕组 D3-D4 端

接阻抗 Z； 转子 Z3-Z4 正弦绕组接负载 ZL， 并

在其中输出正弦规律的信号电压 ； Z1-Z2 绕组

开路。

【3】原、 副边都补偿的正余弦旋转变压器；

原边和副边都补偿时的正余弦旋转变压器如

图 6 - 7 所示， 此时其四个绕组全部用上 ，

转子两个绕组接有外接阻抗 ZL 和 Z 允许 ZL

有所改变。和单独副边或单独原边补偿的两

种方法比较 ， 采用原、 副边都补偿的方法 ，

对消除输出特性畸变的效果更好。 这是因为 ，

单独副边补偿时补偿所用阻抗 Z 的数值和旋

转变压器所带的负载阻抗 ZL 的值必须相等。

对于变动的负载阻抗来说 ， 这样不能实现完

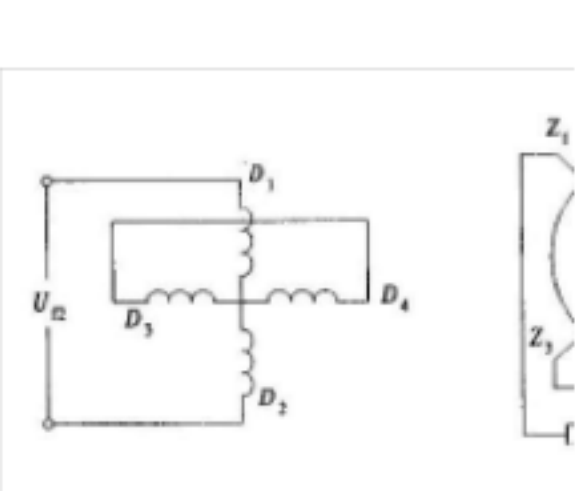
全补偿。而单独原边补偿时 ， 交轴绕组短路 ，

此时负载阻抗改变将不影响补偿程度 ， 即与

负载阻抗值的改变无关 ， 所以原边补偿显得

容易实现。 但是同时采用原、 副边补偿 ， 对

于减小误差、 提高系统性能将是更有利的。



异步型交流伺服电动机

1.：原理：交流异步测速发电机的工作原理

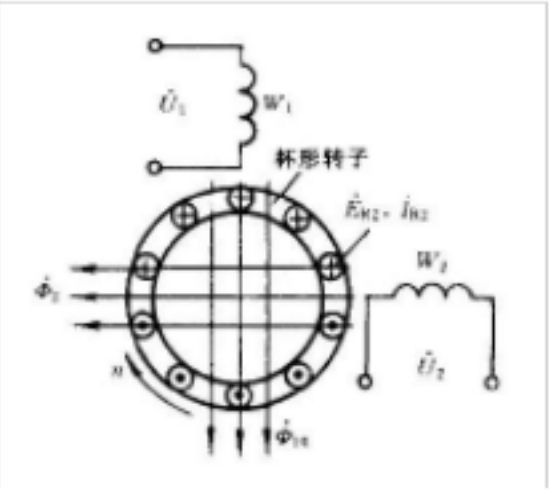
可由图 8 - 4 来说明， 图中 W1 为励磁绕组，

W2 为输出绕组， 它们在空间互差 90 ° 电角

度。 转子是一个非磁空心杯， 在上一章已经

说明， 这杯子可看成是一个鼠笼条数目非常

之多的鼠笼转子。



当转子不动， 即 n=0 时， 若在励磁绕组中

加上频率为 f1 的励磁电压 U1， 则在励磁绕

组中就会有电流通过， 并在内外定子间的气

隙中产生频率与电源频率 f1 相同的脉振磁场。

脉振磁场的轴线与励磁绕组 W1 的轴线一致，

它所产生的脉振磁通 10 与励磁绕组和转子

杯导体相匝链并随时间进行交变。 这时励磁

绕组 W1 与转子杯之间的情况如同变压器原

边与副边之间的情况完全一样。假如忽略励

磁绕组 W1 的电阻 R1 及漏抗 X1， 则可由变

压器的电压平衡方程式看出， 电源电压 U1

与励磁绕组中的感应电势 E1 相平衡， 电源

电压的值近似地等于感应电势的值， 即

U1 = E1 (8 - 2) 由于感应电势 E1 = 10， 故

10 = U1 (8 - 3) 所以当电源电压一定时， 磁

通 10 也保持不变。 图 8 - 4 中画出了某一

瞬间磁通 10 的极性。 由于励磁绕组与输出

绕组相互垂直， 因此磁通 10 与输出绕组

W2 的轴线也互相垂直。 这样， 磁通 10

就不会在输出绕组 W2 中感应出电势， 所以

转速 n=0 时， 输出绕组 W2 也就没有电压

输出。

2.：圆形旋转磁场（重点）...幅值控制... 移

相器... .

步进电动机

1.：原理：步进电动机又称为脉冲电动机， 是

数字控制系统中的一种执行元件。 其功用是

将脉冲电信号变换为相应的角位移或直线位

移， 即给一个脉冲电信号， 电动机就转动

一个角度或前进一步。 反应式步进电动机的

工作原理与反应式同步电动机一样， 也是利

用凸极转子横轴磁阻与直轴磁阻之差所引起

的反应转矩而转动的

2.：工作方式：按 A - B - C - A 方式运行的称为三相单三拍运行。所谓“三相”，是指此步进电动机具有三相定子绕组。三相步进电动机还可以三相六拍和三相双三拍运行。

3.：步矩角与齿矩角：每输入一个脉冲电信号转子转过的角度称为步距角，用符号 θ 表示。从上面分析可见，当电机按四相单四拍运行，即按 A - B - C - D - A 顺序通电时，若开始是 A 相通电，转子齿轴线与 A 相磁极的齿轴线对齐；换接一次绕组，转子转过的角度为 $1/4$ 齿距角；转子需要走 4 步，才转过一个齿距角；此时转子齿轴线又重新与 A 相磁极的齿轴线对齐。当电机在四相八拍运行，即按 A - AB - B - BC - C - CD - D - DA 顺序通电时，换接一次绕组，转子转过的角度为 $1/8$ 齿距角；转子需要走 8 步才转过一个齿距角。由于转子相邻两齿间的夹角，即齿距角为

$$\theta = \frac{360}{Z_r} \quad (\text{式中，} Z_r \text{ 为转子齿数})$$

所以转子每步转过的空间角度（机械角度），即步距角为

$$\theta = \frac{\theta}{N} = \frac{360}{Z_r N}$$

式中，N 为运行拍数，

$$N = km (k=1, 2; m \text{ 为相数})$$

4.：矩角特性：
单相通电时，通电相极下的齿产生转矩，这些齿与转子齿的相对位置及所产生的转矩都是相同的，故可以用一对定、转子齿的相对位置来表示转子位置，电机总的转矩等于通电相极下各个定子齿所产生的转矩之和。
多相通电时 一般来说，多相通电时的矩角特性和最大静态转矩 T_{max} 与单相通电时不同。按照叠加原理，多相通电时的矩角特性近似地可以由每相各自通电时的矩角特性叠加起来求出。

5.：运行：【1】单步运行状态是指步进电动机在单相或多相通电状态下，仅改变一次通电状态时的运行方式，或输入脉冲频率非常之低，以至加第二脉冲之前，前一步已经走完，转子运行已经停止的运行状态

【2】步进电动机的连续脉冲运行状态 这些在书上摘抄 ..

3.要得到圆形旋转磁场，加在励磁绕组和控制绕组上的电压应符合什么条件？
当励磁绕组有效匝数和控制绕组有效匝数相等时，要求两相电压幅值相等，相位相差 90° 度；当励磁绕组有效匝数和控制绕组有效匝数不相等时，要求两相电压相位相差 90° 度，电压幅值应与匝数成正比。

4. 直流电动机的启动性能要求是什么？
1)启动时电磁转矩要大，以利于克服启动时的阻转矩；
2)启动时电枢电流不要太大；
3)要求电动机有较小的转动惯量和在加速过程中保持足够大的电磁转矩以利于缩短启动时间。

5. 为什么交流伺服电动机的转子转速总是比磁铁转速低？
因为电动机轴上总带有机机械负载，即使在空载下，电机本身也会存在阻转矩。为了克服机械负载的阻力矩，转子绕组中必须要有一定大小的电流以产生足够的电磁转矩，而转子绕组中的电流是由旋转磁场切割转子导条产生的，那末要产生一定数量的电流，转子转速必须要低于旋转磁场的转速。

6、从机械性能、工作性能角度分析两相交流伺服电机增大转子电阻的意义。
答：可以增大调速范围，使得机械性能更加线性。异步电机的稳定运行区域为转差率

$0 \sim s_m$ 这一段区域，可调速范围很小。增大转子电阻后，临界转差率 s_m 增大，增大到一定值之后临界转差率 s_m 将大于或等于 1，电机的调速范围就扩展为 $0 \sim n_0$ 。另外还可以防止“自转现象”。

7、为什么自整角变压器在 0° 和 180° 时输出电压都为零，但只有一个位置是稳定的。
答：若调整伺服电动机，在正向控制电压时正向转动，在反向控制电压时反向转动。

1)当自整角变压器的转于处 0° 的位置上，发送机向正方向转动，则控制电压为正，伺服电动机正向转动，带动接收机的转子也正向转动，使失调角减小，直到 0° 为止。同理发送机向负方向转动，伺服电动机带动接收机的转子也向负方向转动，直到 0° 为止。这说明 0° 是稳定协调位置。

2)假如接收机的转于处于 180° 的位置上，

当发送机向正方向转动、其控制电压为负值，伺服电动机带动接收机转于向负的方向转动，失调角趋向增大，不能回到 180° 位置，反之亦然。这说明 180° 不是稳定的协调位置。

9、直流测速发电机的输出特性在负载阻抗增大时如何变化？
答:励磁电流减小，磁通减小，输出电压降低

10、直流伺服电动机调节特性死区大小与哪些因素有关？在不带负载时，其调节特性有无死区？
答：与负载转矩有关，负载转矩越大，死区越大。有，本身纯在机械阻力

11、幅值控制交流伺服电动机在有效信号系数 s 变化时其机械特性如何变化？其电磁转矩 M 与 s 有何关系？
答：机械特性非线性， $0 < s < 1$ 越大，电磁转矩 M 越大，

12、同为三相对称绕组，为什么交流电机三相定子电流产生圆形旋转磁场而自整角机定子三相电流产生脉振磁场。
答：自整角机定子三相电流在时间上同相位