

第三章 测速发电机

§ 3-1 概 述

测速发电机(tachogenerator)是一种检测机械转速的电磁装置。它能把机械转速转换成电压信号，其输出电压与输入的转速成正比关系，如图 3-1 所示。在自动控制系统和计算装置中通常作为测速元件、校正元件、解算元件和角加速度信号元件等。自动控制系统对测速发电机的要求，主要是精确度高、灵敏度高、可靠性好等。具体为：

- (1) 输出电压与转速保持良好的线性关系；
- (2) 剩余电压（转速为零时的输出电压）要小；
- (3) 输出电压的极性和相位能反映被测对象的转向；
- (4) 温度变化对输出特性的影响小；
- (5) 输出电压的斜率大，即转速变化所引起的输出电压的变化要大；
- (6) 摩擦转矩和惯性要小。

此外，还要求它的体积小、重量轻、结构简单、工作可靠、对无线电通讯的干扰小、噪声小等。

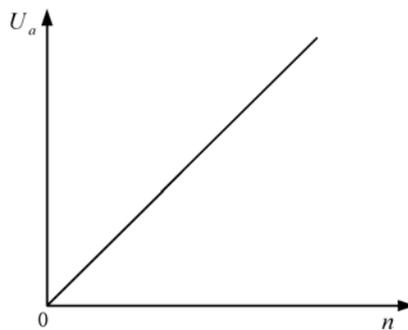


图 3-1 测速发电机输出电压与转速的关系

在实际应用中，不同的自动控制系统对测速发电机的性能要求各有所侧重。例如作解算元件时，对线性误差、温度误差和剩余电压等都要求较高，一般允许在千分之几到万分之几的范围内，但对输出电压的斜率要求却不高；作校正元件时，对线性误差等精度指标的要求不高，而要求输出电压的斜率要大。

测速发电机按输出信号的形式，可分为交流测速发电机和直流测速发电机两大类。

交流测速发电机又有同步测速发电机和异步测速发电机两种。前者的输出电压虽然也与转速成正比，但输出电压的频率也随转速而变化，所以只作指示元件用；后者是目前应用最多的一种，尤其是空心杯转子异步测速发电机性能较好。直流测速发电机有电磁式和永磁式两种。虽然它们存在机械换向问题，会产生火花和无线电干扰，但它的输出不受负载性质的影响，也不存在相角误差，所以在实际中的应用也较广泛。

此外，还有性能和可靠性更高的无刷测速发电机。

§ 3-2 直流测速发电机

一、直流测速发电机的型式

直流测速发电机实际上是一种微型直流发电机。按励磁方式可分为两种型式。

1. 电磁式

表示符号如图 3-2 (a) 所示。定子常为二极，励磁绕组由外部直流电源供电，通电时产生磁场。目前，我国生产的 CD 系列直流测速发电机为电磁式。

2. 永磁式

表示符号如图 3-2 (b) 所示。定子磁极是由永久磁钢做成。由于没有励磁绕组，所以可省去励磁电源。具有结构简单，使用方便等特点，近年来发展较快。其缺点是永磁材料的价格较贵，受机械振动易发生程度不同的退磁。为防止永磁式直流测速发电机的特性变坏，必须选用矫顽力较高的永磁材料。目前，我国生产的 CY 系列直流测速发电机为永磁式。

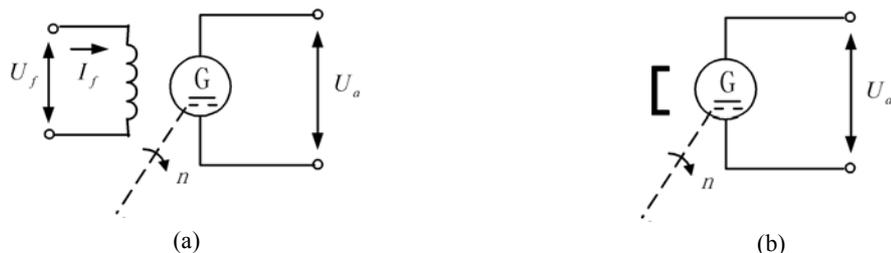


图 3-2 直流测速发电机
(a) 电磁式；(b) 永磁式

永磁式直流测速发电机按其应用场合不同，可分为普通速度型和低速型。前者的工作转速一般在每分钟几千转以上，最高可达每分钟一万转以上；而后者一般在每分钟几百转以下，最低可达每分钟一转以下。由于低速测速发电机能和低速力矩电动机直接耦合，省去了中间笨重的齿轮传动装置，消除了由于齿轮间隙带来的误差，提高了系统的精度和刚度，因而在国防、科研和工业生产等各种精密自动化技术中得到了广泛应用。

二、输出特性(output characteristic)

测速发电机输出电压和转速的关系，即 $U = f(n)$ 称为输出特性。直流测速发电机的工作原理与一般直流发电机相同。根据直流电机理论，在磁极磁通量 Φ 为常数时，电枢感应电动势为

$$E_a = C_e \Phi n = K_e n \quad (3-1)$$

空载时，电枢电流 $I_a = 0$ ，直流测速发电机的输出电压和电枢感应电动势相等，因而输出电压与转速成正比。

负载时，如图 3-3 所示。因为电枢电流 $I_a \neq 0$ ，直流测速发电机的输出电压

$$U_a = E_a - I_a R_a - \Delta U_b \quad (3-2)$$

式中： ΔU_b 为电刷接触压降； R_a 为电枢回路电阻。

在理想情况下，若不计电刷和换向器之间的接触电阻，即 $\Delta U_b = 0$ ，则

$$U_a = E_a - I_a R_a \quad (3-3)$$

显然，带有负载后，由于电阻 R_a 上有电压降，测速发电机的输出电压比空载时小。负载时电枢电流为

$$I_a = \frac{U_a}{R_L} \quad (3-4)$$

式中： R_L 为测速发电机的负载电阻。

将式 (3-4) 代入式 (3-3)，可得

$$U_a = E_a - \frac{U_a}{R_L} R_a$$

经化简后为

$$U_a = \frac{E_a}{1 + \frac{R_a}{R_L}} = \frac{K_e}{1 + \frac{R_a}{R_L}} n = Cn \quad (3-5)$$

式中

$$C = \frac{K_e}{1 + \frac{R_a}{R_L}}$$

C 为测速发电机输出特性的斜率。当不考虑电枢反应，且认为 Φ 、 R_a 和 R_L 都能保持为常数，斜率 C 也是常数，输出特性便有线性关系。对于不同的负载电阻 R_L ，测速发电机输出特性的斜率也不同，它将随负载电阻的增大而增大，如图 3-4 中实线所示。

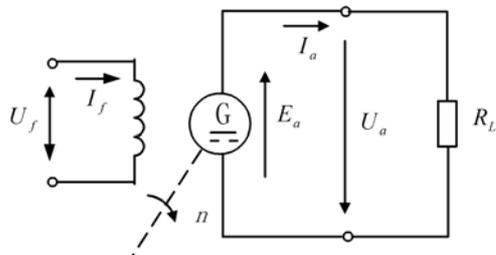


图 3-3 直流测速发电机带负载

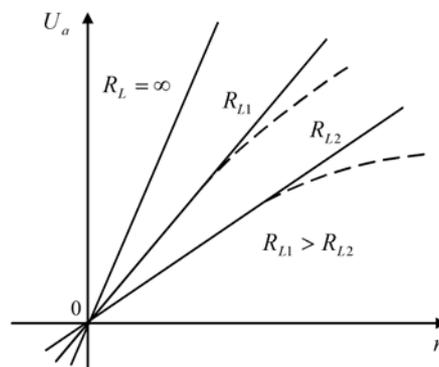


图 3-4 直流测速发电机的输出特性

三、直流测速发电机的误差及减小误差的方法

实际上直流测速发电机的输出特性 $U_a = f(n)$ 并不是严格的线性特性，而与线性特性之间存在有误差。下面讨论产生误差的原因及减小误差的方法。

1. 电枢反应的影响

当直流测速发电机带负载时，负载电流流经电枢，产生电枢反应的去磁作用，使电机气隙磁通减小。因此，在相同转速下，负载时电枢绕组的感应电动势比在空载时电枢绕组的感应电动势小。负载电阻越小或转速越高，电枢电流就越大，电枢反应的去磁作用越强，气隙磁通减小的越多，输出电压下降越显著。致使输出特性向下弯曲，如图 3-4 中虚线所示。

为了减小电枢反应对输出特性的影响，应尽量使电机的气隙磁通保持不变。通常采取以下

一些措施:

(1) 对电磁式直流测速发电机, 在定子磁极上安装补偿绕组。有时为了调节补偿的程度, 还接有分流电阻, 如图 3-5 所示。

(2) 在设计电机时, 选择较小的线负荷 ($A = \frac{N_c i_c}{\pi D_a}$) 和较大的空气隙。

(3) 在使用时, 转速不应超过最大线性工作转速, 所接负载电阻不应小于最小负载电阻。

2. 电刷接触电阻的影响

测速发电机带负载时, 由于电刷与换向器之间存在接触电阻, 会产生电刷的接触压降 ΔU_b , 使输出电压降低。即

$$U_a = E_a - I_a R_a - \Delta U_b = K_e n - \frac{U_a}{R_L} R_a - \Delta U_b \quad (3-6)$$

$$U_a = \frac{K_e}{1 + \frac{R_a}{R_L}} n - \frac{\Delta U_b}{1 + \frac{R_a}{R_L}} = Cn - \frac{C}{K_e} \Delta U_b \quad (3-7)$$

电刷接触电阻是非线性的, 它与流过的电流密度有关。当电枢电流较小时, 接触电阻大, 接触压降也大; 电枢电流较大时, 接触电阻小。可见接触电阻与电流成反比。只有电枢电流较大, 电流密度达到一定数值后, 电刷接触压降才可近似认为是常数。考虑到电刷接触压降的影响, 直流测速发电机的输出特性, 如图 3-6 所示。

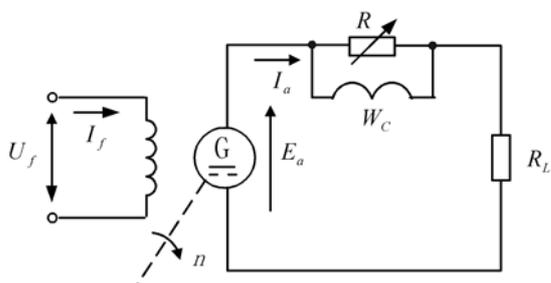


图 3-5 有补偿绕组时的接线图

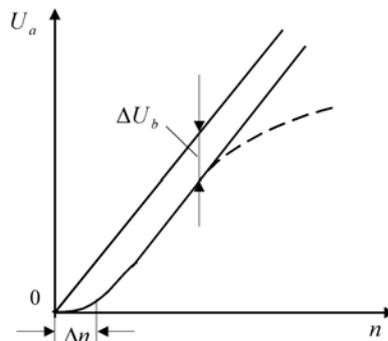


图 3-6 考虑电刷接触压降后的输出特性

由图 3-6 可见, 在转速较低时, 输出特性上有一段输出电压极低的区域, 这一区域叫不灵敏区, 以符号 Δn 表示。即在此区域内, 测速发电机虽然有输入信号 (转速), 但输出电压很小, 对转速的反应很不灵敏。接触电阻越大, 不灵敏区也越大。

为了减小电刷接触压降的影响, 缩小不灵敏区, 在直流测速发电机中, 常常采用导电性能较好的黄铜—石墨电刷或含银金属电刷。铜制换向器的表面容易形成氧化层, 也会增大接触电阻, 在要求较高的场合, 换向器也用含银合金或者在表面渡上银层, 这样也可以减小电刷和换向器之间的磨损。

当同时考虑电枢反应和电刷接触压降的影响, 直流测速发电机的输出特性应如图 3-6 中的虚线所示。在负载电阻很小或转速很高时, 输出电压与转速之间出现明显非线性关系。因此, 在实际使用时, 宜选用较大的负载电阻和适当的转子转速。

3. 电刷位置的影响

当直流测速发电机带负载运行时，若电刷没有严格地位于几何中性线上，会造成测速发电机正反转时输出电压不对称，即在相同的转速下，测速发电机正反向旋转时，输出电压不完全相等。这是因为当电刷偏离几何中性线一个不大的角度时，电枢反应的直轴分量磁通若在一种转向下起着去磁作用，而在另一种转向下起着增磁作用。因此，在两种不同的转向下，尽管转速相同，电枢绕组的感应电动势不相等，其输出电压也不相等。

4. 温度的影响

电磁式直流测速发电机在实际工作时，由于周围环境温度的变化以及电机本身发热（由电机各种损耗引起），都会引起电机中励磁绕组电阻的变化。当温度升高时，励磁绕组电阻增大。这时即使励磁电压保持不变，励磁电流也将减小，磁通也随之减小，导致电枢绕组的感应电动势和输出电压降低。铜的电阻温度系数约为 $0.004/^\circ\text{C}$ ，即当温度每升高 25°C ，其电阻值相应增加 10%。所以，温度的变化对电磁式直流测速发电机输出特性的影响是很严重的。

为了减小温度变化对输出特性的影响，通常可采取下列措施：

(1) 设计电机时，磁路比较饱和，使励磁电流的变化所引起磁通的变化较小。

(2) 在励磁回路中串联一个阻值比励磁绕组电阻大几倍的附加电阻来稳流。附加电阻可用温度系数较低的合金材料制成，如锰镍铜合金或镍铜合金，它的阻值随温度变化较小。这样尽管温度变化，引起励磁绕组电阻变化，但整个励磁回路总电阻的变化不大，磁通变化也不大。其缺点是励磁电源电压也需增高，励磁功率随之增大。

对测速精度要求比较高的场合，为了减小温度变化所引起的误差，可在励磁回路中串联具有负温度系数的热敏电阻并联网路，如图 3-7 所示。只要使负温度系数的并联网路所产生电阻的变化与正温度系数的励磁绕组电阻所产生的变化相同，励磁回路的总电阻就不会随温度而变化，因而励磁电流及励磁磁通也就不会随温度而变化。

(3) 励磁回路由恒流源供电，但相应的造价会提高。

当然，温度的变化也要影响电枢绕组的电阻。但由于电枢电阻数值较小，所造成的影响也小，可不予考虑。

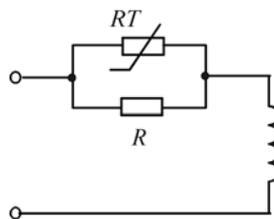


图 3-7 励磁回路中的热敏电阻并联网路

5. 纹波的影响

实际上直流测速发电机，在 Φ 和 n 为定值时，其输出电压并不是稳定的直流电压，而总是带有微弱的脉动，通常把这种脉动称为纹波。

引起纹波的因素很多，主要是电机本身的固有结构及加工误差所引起。电枢绕组的电动势是每条支路中电枢元件电动势的叠加。由于电机中每个电枢元件的感应电动势是变化的，所以电枢电动势也不是恒定的，即存在纹波。增加每条支路中串联的元件数，可以减小纹波。但由于工艺所限，电机的槽数、元件数及换向片数不可能无限增加，所以输出电压不可避免要产生脉动。另外，由于电枢铁芯有齿有槽，气隙不均匀，铁芯材料的导磁性能各向相异等，也会使

输出电压中纹波幅值上升。

电枢采用斜槽结构，可减小由于齿和槽所引起的输出电压中的高次谐波，从而减小纹波。

纹波电压的存在，对于测速发电机用于速度反馈或加速度反馈系统都很不利。特别在高精度的解算装置中更是不允许。因此，实用的测速发电机在结构和设计上都采取了一定的措施来减小纹波幅值。如无槽电枢电机输出电压纹波幅值只有槽电枢电机的五分之一。

四、直流测速发电机的性能指标

1. 线性误差 $\Delta U\%$

在其工作的转速范围内，实际输出电压与理想输出电压的最大差值 ΔU_m 与最大理想输出电压 U_{am} 之比称为线性误差，即

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U_m}{U_{am}} \times 100\% \quad (3-8)$$

如图 3-8 所示。一般要求 $\Delta U\% = 1\% \sim 2\%$ ，要求较高的系统 $\Delta U\% = 0.1\% \sim 0.25\%$ 。 n_b 一般为 $5/6 n_m$ 。

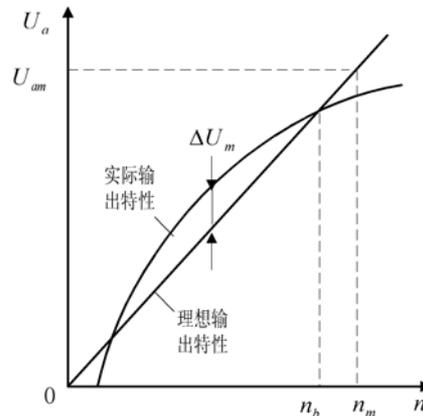


图 3-8 线性误差计算原理图

2. 最大线性工作转速 n_m

在允许的线性误差范围内的电枢最高转速称为最大线性工作转速。亦即测速发电机的额定转速。

3. 输出斜率 K_g

在额定的励磁条件下，单位转速所产生的输出电压称为输出斜率。此值越大越好。增大负载电阻，可提高输出斜率。

4. 负载电阻 R_L

保证输出特性在允许误差范围内的最小负载电阻值。在使用时，接到电枢两端的电阻应不小于此值。

5. 不灵敏区 Δn

由于换向器与电刷间的接触压降 ΔU_b ，而导致测速发电机在低转速时，其输出电压很低，几乎为零，这个转速范围称为不灵敏区。

6. 输出电压的不对称度 K_{ub}

在相同转速下，测速发电机正反转时的输出电压绝对值之差 ΔU_{a2} 与两者平均值 U_{av} 之比称为输出电压的不对称度，即

$$K_{ub} = \frac{\Delta U_{a2}}{U_{av}} \times 100\% \quad (3-9)$$

一般不对称度为 0.35%~2%。

7. 纹波系数 K_u

在一定转速下，输出电压中交流分量的峰值与直流分量之比称为纹波系数。

§ 3-3 交流异步测速发电机

交流测速发电机可分为同步测速发电机和异步测速发电机(asynchronous tachogenerator)两大类。

同步测速发电机又分为永磁式、感应子式和脉冲式三种。由于同步测速发电机感应电动势的频率随转速变化，致使负载阻抗和电机本身的阻抗均随转速而变化，所以在自动控制系统中较少采用。故本书不作进一步的介绍。

异步测速发电机按其结构可分为鼠笼转子和空心杯转子两种。它的结构与交流伺服电动机相同。鼠笼转子异步测速发电机输出斜率大，但线性度差，相位误差大，剩余电压高，一般只用在精度要求不高的控制系统中。空心杯转子异步测速发电机的精度较高，转子转动惯量也小，性能稳定。目前，我国生产的这种测速发电机的型号为 CK。

一、空心杯转子异步测速发电机的结构和工作原理

空心杯转子异步测速发电机的结构与空心杯转子交流伺服电动机一样，它的转子也是一个薄壁非磁性杯，杯壁厚约为 0.2~0.3mm，通常由电阻率比较高的硅锰青铜或锡锌青铜制成。定子上嵌有空间相差 90°电角度的两相绕组，其中一相绕组为励磁绕组 W_f ；另一相绕组为输出绕组 W_2 。在机座号较小的电机中，一般把两相绕组都嵌在内定子上；机座号较大的电机，常把励磁绕组嵌在外定子上，把输出绕组嵌在内定子上。有时为了便于调节内、外定子的相对位置，使剩余电压最小，在内定子上还装有内定子转动调节装置。

为了减小由于磁路不对称和转子电气性能的不平衡所引起的不良影响，空心杯转子异步测速发电机通常采用四极电机。

空心杯转子异步测速发电机的工作原理，如图 3-9 所示。空心杯转子可以看成是一个鼠笼导体数目很多的鼠笼转子。当电机的励磁绕组加上频率为 f 的交流电压 \dot{U}_f ，则在励磁绕组中就会有电流 \dot{I}_f 通过，并在内外定子间的气隙中产生脉振磁场。脉振的频率与电源频率 f 相同，脉振磁场的轴线与励磁绕组 W_f 的轴线一致。

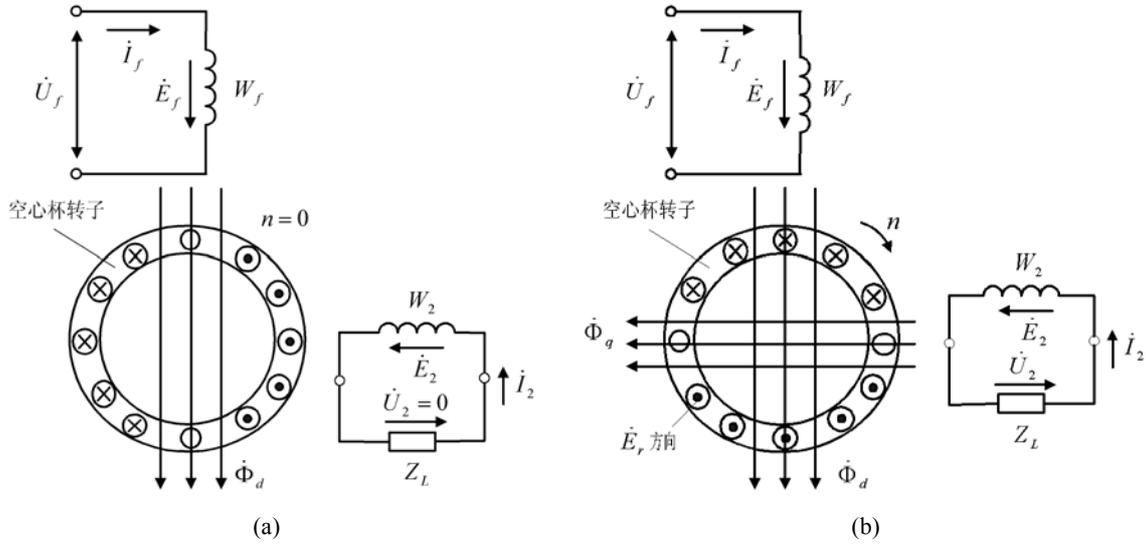


图 3-9 异步测速发电机的工作原理
(a) 转子静止时；(b) 转子转动时

当转子静止 ($n=0$) 时, 转子杯导条与脉振磁通 Φ_d 相匝链, 并产生感应电动势。这时励磁绕组与转子杯之间的电磁耦合情况和变压器一次侧和二次侧的情况完全一样。因此, 脉振磁场在励磁绕组和转子杯中分别产生的感应电动势称为变压器电动势。

若忽略励磁绕组 W_f 的电阻 R_1 及漏抗 X_1 , 则根据变压器的电压平衡方程式, 电源电压 \dot{U}_f 与励磁绕组中的感应电动势 \dot{E}_f 相平衡, 电源电压的大小近似地等于感应电动势的大小, 即

$$U_f \approx E_f \quad (3-10)$$

又因为 $E_f \propto \Phi_d$, 故

$$\Phi_d \propto U_f \quad (3-11)$$

所以电源电压 U_f 一定时, 磁通 Φ_d 也基本保持不变。

由于输出绕组的轴线与励磁绕组的轴线相差 90° 电角度。因此, 磁通 Φ_d 与输出绕组无匝链, 不会在输出绕组中产生感应电动势, 输出电压 \dot{U}_2 为零, 如图 3-9 (a) 所示。

当转子以转速 n 转动时, 转子杯中除了上述变压器电动势外, 转子杯导条切割磁通 Φ_d 而产生切割电动势 \dot{E}_r (或称旋转电动势), 如图 3-9 (b) 所示。由于磁通 Φ_d 为脉振磁通, 所以电动势 \dot{E}_r 亦为交变电动势。其交变的频率为磁通 Φ_d 的脉振频率 f 。它的大小为

$$E_r = C_2 n \Phi_d \quad (3-12)$$

式中: C_2 为电动势比例常数。

若磁通 Φ_d 的幅值为恒定时, 则电动势 E_r 与转子的转速 n 成正比关系。

由于转子杯为短路绕组, 电动势 \dot{E}_r 就在转子杯中产生短路电流 \dot{I}_r , 电流 \dot{I}_r 也是频率为 f 的交变电流, 其大小正比于电动势 \dot{E}_r 。若忽略转子杯中漏抗的影响, 电流 \dot{I}_r 在时间相位上与转子杯电动势 \dot{E}_r 同相位, 即在任一瞬时, 转子杯中的电流方向与电动势方向一致。

当然, 转子杯中的电流 \dot{I}_r 也要产生脉振磁通 Φ_q , 其脉振频率仍为 f , 而大小则正比于电流

i_r ，即

$$\Phi_q \propto I_r \propto E_r \propto n \quad (3-13)$$

无论转速如何，由于转子杯上半周导体的电流方向与下半周导体的电流方向总相反，而转子导条沿着圆周又是均匀分布的。因此，转子杯中的电流 i_r 产生的脉振磁通 $\dot{\Phi}_q$ 在空间的方向总是与磁通 $\dot{\Phi}_d$ 垂直，而与输出绕组 W_2 的轴线方向一致。 $\dot{\Phi}_q$ 将在输出绕组中感应出频率为 f 的电动势 \dot{E}_2 ，从而产生测速发电机的输出电压 \dot{U}_2 ，它的大小正比与 $\dot{\Phi}_q$ ，即

$$U_2 \propto E_2 \propto \Phi_q \propto n \quad (3-14)$$

因此，当测速发电机励磁绕组加上电压 \dot{U}_f ，电机以转速 n 旋转时，测速发电机的输出绕组将产生输出电压 \dot{U}_2 。它的频率和电源频率 f 相同，与转速 n 的大小无关；输出电压的大小与转速 n 成正比。当电机反转时，由于转子杯中的电动势、电流及其产生的磁通的相位都与原来相反，因而输出电压 \dot{U}_2 的相位也与原来相反。这样，异步测速发电机就可以很好地将转速信号转换成电压信号，实现测速的目的。

以上分析可见，为了保证测速发电机的输出电压和转子转速成严格正比关系，就必须保证磁通 $\dot{\Phi}_d$ 为常数。实际上，由于转子杯漏抗的影响，磁通 $\dot{\Phi}_d$ 要发生变化。另一方面，当电机中产生磁通 $\dot{\Phi}_q$ 后，转子杯旋转时又同时切割磁通 $\dot{\Phi}_q$ ，同样又会产生与磁通 $\dot{\Phi}_d$ 轴线相同的磁通，使 $\dot{\Phi}_d$ 发生变化。这些因素都将影响到测速发电机输出特性的线性度。所以，在测速发电机的结构选型和参数选择时，对上述因素都需要认真考虑。

为了解决转子漏抗对输出特性的影响，异步测速发电机都采用非磁性空心杯转子，并使空心杯的电阻值取得相当大。这样，就可完全略去转子漏阻抗的影响。同时因转子电阻增大后，也可以使转子切割磁通 $\dot{\Phi}_q$ 所产生的与励磁绕组轴线相同的磁动势大大削弱。但是，转子的电阻值选得过大，会使测速发电机输出电压的斜率降低，电机的灵敏度下降。

此外，为了保证磁通 $\dot{\Phi}_d$ 尽可能不变，还必须设法减小励磁绕组的漏阻抗。因为在外加励磁电源电压不变时，即使因转子磁动势引起的励磁电流变化，漏阻抗压降变化的也很小，励磁磁通 $\dot{\Phi}_d$ 也就基本上保持不变。

二、异步测速发电机的输出特性

在理想情况下，异步测速发电机的输出特性应是直线，但实际上异步测速发电机输出电压与转速之间并不是严格的线性关系，而是非线性的。应用双旋转磁场理论或交轴磁场理论，在励磁电压和频率不变的情况下，可得

$$U_2 = \frac{An^*}{1+B(n^*)^2} U_f \quad (3-15)$$

$$n^* = \frac{n}{60f/p}$$

式中： n^* 为转速的标么值； A 为电压系数，是与电机及负载参数有关的复系数； B 为与电机及负载参数有关的复系数。

由式 (3-15) 可以看出，由于分母中有 $B(n^*)^2$ 项，使输出特性不是直线而是一条曲线，如

图 3-10 所示。造成输出电压与转速成非线性关系，是因为异步测速发电机本身的参数是随电机的转速而变化的；其次输出电压与励磁电压之间的相位差也将随转速而变化。

此外，输出特性还与负载的大小、性质以及励磁电压的频率与温度变化等因素有关。

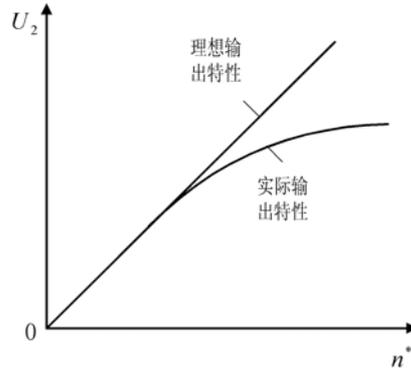


图 3-10 异步测速发电机的输出特性

三、负载阻抗对输出特性的影响

异步测速发电机在控制系统中工作时，一般情况下输出绕组所连接的负载阻抗是很大的，所以可以近似地用输出绕组开路的情况进行分析。但倘若负载阻抗不是足够大，负载阻抗对电机的性能就会有影响。下面来讨论不同负载对输出电压的影响。

由于异步测速发电机输出电压与负载阻抗之间的函数关系是相当复杂的，所以为了分析方便，假设励磁电压 \dot{U}_f 不变时，磁通 Φ_d 为常数。这样，输出绕组的感应电动势 \dot{E}_2 就仅与转速成正比，当转速不变时，电动势 \dot{E}_2 也为常数，且设此时 \dot{E}_2 滞后励磁电压 φ_0 相角。输出绕组的电压平衡方程式为

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2(R_2 + jX_2) = \dot{I}_2 Z_L + \dot{I}_2(R_2 + jX_2) \quad (3-16)$$

式中： R_2 和 X_2 分别为输出绕组的电阻和漏抗。

下面用相量图来观察 \dot{E}_2 不变时，负载阻抗 Z_L 对输出电压 \dot{U}_2 的影响。

(一) $Z_L = R_L$ 时，即测速发电机接有纯电阻负载时的情况

由式 (3-16) 可得

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 R_L + \dot{I}_2(R_2 + jX_2) = \dot{I}_2(R_L + R_2) + j\dot{I}_2 X_2 = \text{常数} \quad (3-17)$$

由式 (3-17)，以励磁电压 \dot{U}_f 为参考相量，作出相量图，如图 3-11 所示。

空载时 $\dot{I}_2 = 0$ ，输出电压 $\dot{U}_2 = \dot{E}_2$ ， \dot{U}_2 与 \dot{U}_f 的相位差为 φ_0 。当负载时，有 $OC = U_2 = I_2 Z_L = I_2 R_L$ ， OC 的方向也是 \dot{I}_2 的方向。 $CB = I_2 R_2$ ； $BA = I_2 X_2$ ； $OA = E_2$ ； $\alpha = \arctan \frac{X_2}{R_2} = \text{常数}$ ； $\beta = 180^\circ - \alpha = \text{常数}$ 。

由于 $\triangle OBA$ 为直角三角形，并且 \dot{E}_2 为常数不变，所以负载变化时， B 点的轨迹应为以 OA 为直径的圆弧。又因 α 角不随 R_L 而变化， β 角也为常数，所以输出电压 \dot{U}_2 的端点 C 的轨迹应为圆弧 OCA 。当负载电阻 R_L 减小时， B 点移至 B' 点， C 点移至 C' 点，输出电压 \dot{U}_2 由 OC 减小至 OC' ，输出电压与励磁电压之间的相位差由 φ 增加至 φ' 。当 $R_L = 0$ 时， $\dot{U}_2 = 0$ 。

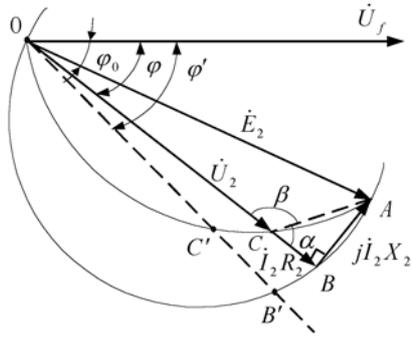


图 3-11 $Z_L=R_L$ 时输出电压的变化

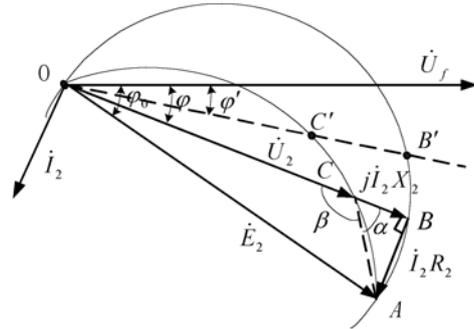


图 3-12 $Z_L=jX_L$ 时输出电压的变化

(二) $Z_L = jX_L$ 时, 即测速发电机接纯电感负载时的情况

由式 (3-16) 可得

$$\dot{E}_2 = j\dot{I}_2 X_L + \dot{I}_2 (R_2 + jX_2) = \dot{I}_2 R_2 + j\dot{I}_2 (X_L + X_2) = \text{常数} \quad (3-18)$$

由式 (3-18) 作出相量图, 如图 3-12 所示。 $CB = I_2 X_2$; $OC = U_2$; $BA = I_2 R_2$; $OA = E_2$;

$$\alpha = \arctan \frac{R_2}{X_2}。$$

同理可知, 当负载感抗 X_L 改变时, 输出电压 \dot{U}_2 的端点 C 的轨迹为圆弧 OCA 。当负载感抗 X_L 减小时, C 点移至 C' 点, 输出电压 \dot{U}_2 以及它与励磁电压之间的相位差同时都要减小。当 X_L 变得相当小时, 有可能 \dot{U}_2 超前 \dot{U}_f 。当 $X_L=0$ 时, $\dot{U}_2=0$ 。

(三) $Z_L = -jX_c$ 时, 即测速发电机接纯电容负载时的情况

由式 (3-16) 可得

$$\dot{E}_2 = -j\dot{I}_2 X_c + \dot{I}_2 (R_2 + jX_2) = \dot{I}_2 R_2 + j\dot{I}_2 (X_2 - X_c) = \text{常数} \quad (3-19)$$

由式 (3-19) 作出相量图, 如图 3-13 所示。 $CB = I_2 X_2$; $OC = U_2$; $BA = I_2 R_2$; $OA = E_2$;

$$\alpha = \arctan \frac{R_2}{X_2}。$$

同理可知, 当负载容抗 X_c 改变时, 输出电压 \dot{U}_2 的端点 C 的轨迹为圆弧 OCA 。当负载容抗 $X_c = \frac{R_2^2 + X_2^2}{X_2}$ 时, 输出电压有最大值 $OC' = U_{2m}$, 即为轨迹圆的直径。因此, 当负载容抗 X_c 由 ∞ 减小至 $X_c = \frac{R_2^2 + X_2^2}{X_2}$ 时, 输出电压 \dot{U}_2 随之增大, 相位角 φ 也随之增大; 当负载容抗由 $X_c = \frac{R_2^2 + X_2^2}{X_2}$ 再继续减小时, 输出电压 \dot{U}_2 则随之减小, 相位角 φ 却继续增大, 最后甚至超过 90° 。

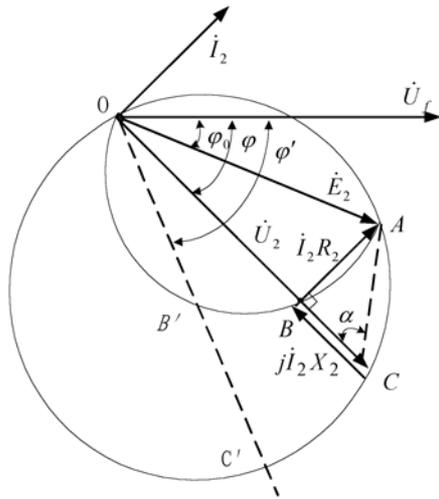


图 3-13 $Z_L = -jX_C$ 时输出电压的变化

综合以上分析可得输出电压的大小和相位移与负载阻抗的关系，如图 3-14 所示。由此可得如下结论：

(1) 当异步测速发电机的转速一定，且负载阻抗足够大时，无论什么性质的负载，即使负载阻抗有变化也不会引起输出电压有明显改变。

(2) 当 $X_c > \frac{R_2^2 + X_2^2}{X_2}$ 时电容负载和电阻负载对输出电压值的影响是相反的。所以，若测速发电机输出绕组接有电阻—电容负载时，则负载阻抗的改变对输出电压值的影响可以互补，有可能使输出电压不受负载变化的影响，但却扩大了对相位移的影响。

(3) 若输出绕组接有电阻—电感负载，则可获得相位移不受负载阻抗改变的影响，但却扩大了对输出电压值的影响。

在实际中到底选用什么性质的负载，即对输出电压的幅值还是其相位移进行互补，应由系统的要求来决定。一般希望输出电压值不受负载变化的影响，故常采用电阻—电容负载。

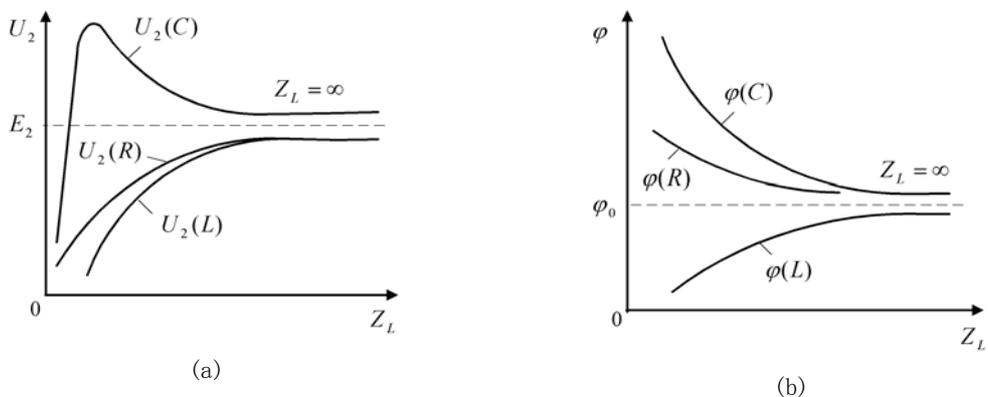


图 3-14 输出电压的大小和相位与负载阻抗的关系
(a) $U_2 = f(Z_L)$; (b) $\varphi = f(Z_L)$

四、产生误差的原因及减小的措施

1. 气隙磁通 $\dot{\Phi}_d$ 的变化

根据异步测速发电机的工作原理，当略去励磁绕组和转子漏阻抗的影响，气隙磁通 $\dot{\Phi}_d$ 能保持常数，输出电压与转速之间便有线性关系。事实上，漏阻抗总是存在的，当转子旋转切割磁通 $\dot{\Phi}_d$ 后，在转子杯导条中产生的电流 i_r 将在时间相位上滞后电动势 \dot{E}_r 一个角度。在同一瞬时，转子杯中电流方向如图 3-15 中的内圈符号所示。由电流 i_2 所产生的磁通 $\dot{\Phi}_r$ 在空间上就不与 $\dot{\Phi}_d$ 相差 90° 电角度。但可以把它分解为 $\dot{\Phi}_2$ 和 $\dot{\Phi}'_d$ 两个分量，其中 $\dot{\Phi}'_d$ 的方向与磁通 $\dot{\Phi}_d$ 正好相反，起去磁作用；另外，转子旋转还要切割磁通 $\dot{\Phi}_2$ ，又要在转子杯导条中产生切割电动势 \dot{E}'_r 和电流 i'_2 ，而且它们正比于转速 n 的平方。根据磁通 $\dot{\Phi}_2$ 与转速 n 的方向，可确定出在此瞬间 \dot{E}'_r 和 i'_2 的方向，如图 3-15 中的外圈符号所示（为了简化起见，这里仍不计 X_2 的影响）。当然 i'_2 也要产生磁通。由图可见， i'_2 所产生的磁通 $\dot{\Phi}''_d$ 的方向也与磁通 $\dot{\Phi}_d$ 正好相反，也起去磁作用。根据磁动势平衡原理，励磁绕组的电流 i_f 发生变化。即使外加励磁电压 \dot{U}_f 不变，电流 i_f 的变化也将引起励磁绕组漏阻抗压降的变化，使磁通 $\dot{\Phi}_d$ 也随之发生变化，即随着转速的增大而减小。这样就破坏了输出电压 \dot{U}_2 与转速 n 的线性关系，使输出特性在转速 n 较大时，特性变得向下弯曲。

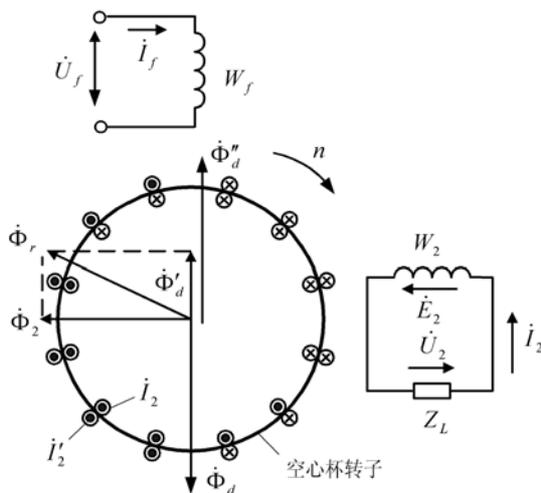


图 3-15 转子杯电流对定子的影响

显然，减小励磁绕组的漏阻抗或增大转子电阻，都可以减小气隙磁通 $\dot{\Phi}_d$ 的变化。而减小励磁绕组的漏阻抗，会使电机的体积增大。为此，常采用增大转子电阻的办法，来满足输出特性的线性要求。

此外，通过减小电机的相对转速 n^* 也可减小输出电压的误差。对于一定的转速，通常采用提高励磁电源的频率，从而增大异步测速发电机的同步转速来实现。因此，异步测速发电机大都采用 400Hz 的中频励磁电源。

2. 励磁电源的影响

异步测速发电机对励磁电源电压的幅值、频率和波形要求都比较高。电源电压幅值不稳定，会直接引起输出电压的波动。频率的变化对输出电压的大小和相角也有明显的影响。随着频率

的增加，在电感性负载时，输出电压稍有增长；而在电容性负载时，输出电压的增加比较明显；在电阻负载时，输出电压的变化是最小的。频率的变化对相角的影响更为严重。因为频率的增加使得电机中的漏阻抗增加，输出电压的相位更加滞后。但当转子电阻较大时，相位滞后的要小一些。此外，波形的失真会引起输出电压中含有高次谐波分量。

3. 温度的影响

电机温度的变化，会使励磁绕组和空心杯转子的电阻以及磁性材料的磁性能发生变化，从而使输出特性发生改变。温度升高使输出电压降低，而相角增大。为此，在设计空心杯时应选用电阻温度系数较小的材料。在实际使用时，可采用温度补偿措施。最简单的方法是在励磁回路、输出回路或同时在两个回路串联负温度系数的热敏电阻来补偿温度变化的影响。

五、异步测速发电机的主要技术指标

表征异步测速发电机性能的技术指标主要有线性误差、相位误差和剩余电压。

(一) 线性误差

异步测速发电机的输出特性是非线性的，在工程上用线性误差来表示它的非线性度。

工程上为了确定线性误差的大小，一般把实际输出特性上对应于 $n_c^* = \sqrt{3}n_m^*/2$ 的一点与坐标原点的连线作为理想输出特性，其中 n_m^* 为最大转速标么值。将实际输出电压与理想输出电压的最大差值 ΔU_m 与最大理想输出电压 U_{2m} 之比定义为线性误差，如图 3-16 所示。即

$$\delta = \frac{\Delta U_m}{U_{2m}} \times 100\% \quad (3-20)$$

式中： U_{2m} 为规定的最大转速对应的线性输出电压。

一般线性误差大于 2% 时，用于自动控制系统作校正元件；而作为解算元件时，线性误差必须很小，约为千分之几以上。目前，高精度异步测速发电机线性误差可达 0.05% 左右。

(二) 相位误差

自动控制系统希望测速发电机的输出电压与励磁电压同相位。实际上测速发电机的输出电压与励磁电压之间总是存在相位移（见图 3-11~图 3-13），且相位移的大小还随着转速的不同而变化。在规定的转速范围内，输出电压与励磁电压之间的相位移的变化量 $\Delta\varphi$ 称为相位误差，如图 3-17 所示。

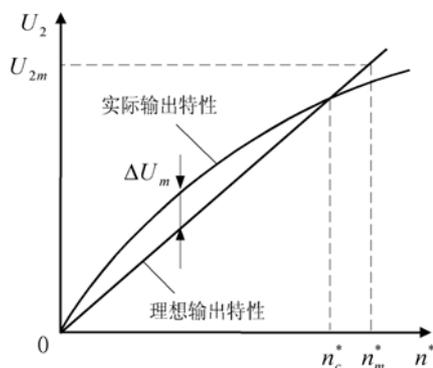


图 3-16 输出特性线性度

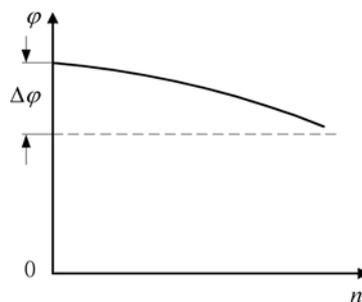


图 3-17 相位特性

异步测速发电机的相位误差一般不超过 $1^\circ \sim 2^\circ$ 。由于相位误差与转速有关，所以很难进行

补偿。为了满足控制系统的要求，目前应用较多的是在输出回路中进行移相，即输出绕组通过RC移相网络后再输出电压，如图3-18所示。调节 R_1 和 C_1 的值可使输出电压 \dot{U}_2 进行移相；电阻 R_2 和 R_3 组成分压器，改变 R_2 和 R_3 的阻值可调节输出电压 \dot{U}_2 的大小。采用这种方法移相时，整个RC网络和后面的负载一起组成测速发电机的负载。

(三) 剩余电压(null voltage)

在理论上测速发电机的转速为零时，输出电压也为零。但实际上异步测速发电机转速为零时，输出电压并不为零，这就会使控制系统产生误差。这种测速发电机在规定的交流电源励磁下，电机的转速为零时，输出绕组所产生的电压，称为剩余电压（或零速电压）。它的数值一般只有几十毫伏，但它的存在却使的输出特性曲线不再从坐标的原点开始，如图3-19所示。它是引起异步测速发电机误差的主要部分。

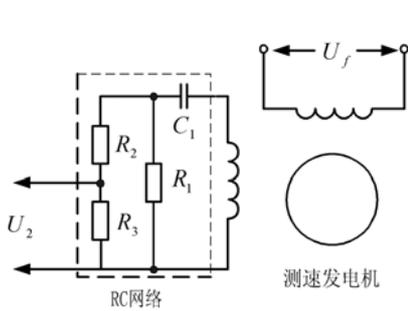


图 3-18 输出回路中的移相

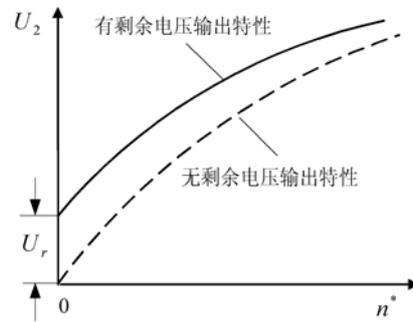


图 3-19 剩余电压对输出特性的影响

六、产生剩余电压的原因及减小措施

剩余电压包含基波分量和高次谐波分量，它们产生的原因也各不相同，下面分别加以说明，并指出消除的办法。

1. 基波分量

剩余电压的基波分量包含变压器分量、旋转分量和电容分量三部分。

(1) 变压器分量 产生变压器分量的主要原因是，励磁绕组和输出绕组的轴线在空间位置上不是严格相差 90° 电角度，或者磁路不对称。图3-20表示由于内定子加工成椭圆，使气隙不均匀，引起磁路不对称，励磁磁通发生扭斜，部分磁通匝链输出绕组，使输出绕组中产生感应电动势，产生剩余电压。

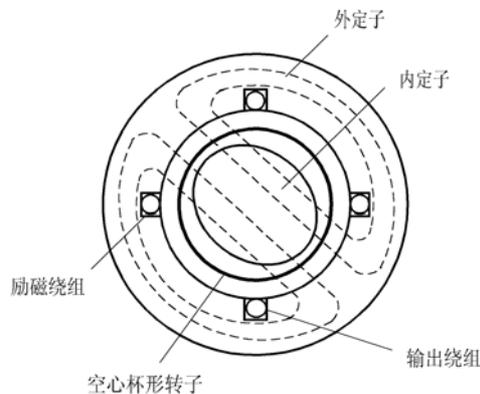


图 3-20 内定子椭圆引起的剩余电压

(2) 旋转分量 由于铁芯材料各向磁滞变化的情况不同, 或者铁芯片间短路以及空心杯转子的材料和壁厚不均匀, 都会导致去磁效应不同, 使电机气隙圆周上各点磁密相位不一致, 而形成椭圆旋转磁场, 使输出绕组产生感应电动势, 产生剩余电压。

(3) 电容分量 由于励磁绕组和输出绕组之间会存在寄生的分布电容。当励磁绕组加交流电压时, 通过寄生的分布电容也会在输出绕组中产生电压, 此电压称之为剩余电压中的电容分量。

剩余电压的基波分量也可分为交变分量和固定分量。交变分量是由于转子形状不规则及材料各向异性等原因所引起, 其大小与转子位置有关, 随转子位置成周期性变化, 如图 3-21 所示。除此之外, 其他原因所引起的剩余电压与转子位置无关, 即为剩余电压的固定分量。

剩余电压基波分量的相位与励磁电压的相位也是不同的, 如图 3-22 所示。一般将 \dot{U}_r 分解成两个分量, 一个是相位与 \dot{U}_f 相同的称为同相分量 \dot{U}_{rd} ; 另一个是相位与 \dot{U}_f 成 90° 的称为正交分量 \dot{U}_{rq} 。

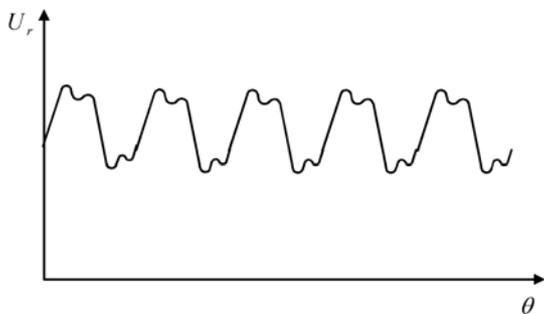


图 3-21 剩余电压的交变分量

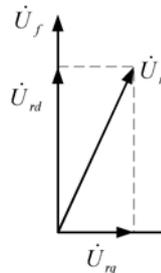


图 3-22 剩余电压的同相和正交分量

2. 高次谐波分量

(1) 励磁电源电压波形为非正弦 非正弦波的励磁电压中含有高次谐波分量, 它可以通过变压器耦合、电磁感应以及分布电容的直接传导等方式, 在输出绕组中产生剩余电压的高次谐波分量。

(2) 电机磁路的饱和 当电机工作在磁路的饱和状态时, 即使励磁绕组外加正弦交流电压, 励磁电流也是非正弦波形。使励磁绕组的漏阻抗压降为非正弦波, 励磁磁通中产生高次谐波, 从而使输出电压中产生剩余电压的高次谐波。

总之, 异步测速发电机存在剩余电压会给自动控制系统带来不利影响。剩余电压的基波同相分量, 将使系统产生误动作; 剩余电压的基波正交分量及高次谐波分量, 会使放大器饱和, 使放大倍数受到影响。所以必须设法减小异步测速发电机的剩余电压。

3. 减小剩余电压的措施

(1) 改进电机的制造材料及工艺 选用较低磁密的铁芯, 降低磁路的饱和度; 采用可调铁芯结构或定子铁芯旋转叠装法; 采用具有补偿绕组的结构等, 都可减小剩余电压。

(2) 外接补偿装置 在电机的外部采用适当的线路, 产生一个校正电压来抵消电机所产生的剩余电压。图 3-23 (a) 是用分压器的办法, 取出一部分励磁电压去补偿剩余电压。图 3-23 (b) 是阻容电桥补偿法, 调节电阻 R_1 的大小, 可改变校正电压的大小, 调节电阻 R 的大小可

改变校正电压的相位，以达到有效补偿剩余电压的目的。有时为了消除剩余电压中的高次谐波，在输出绕组端设置滤波电路。

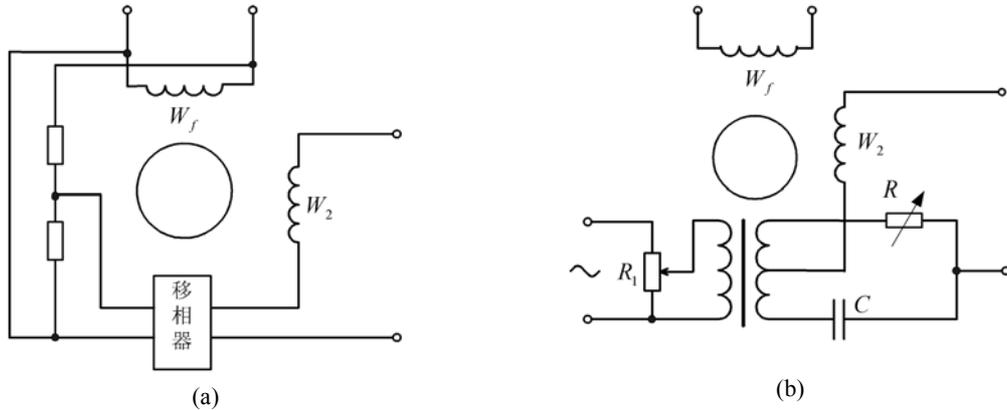


图 3-23 剩余电压补偿电路
(a) 校正补偿；(b) 电桥补偿

§ 3-4 其他型式的测速发电机

一、永磁式高灵敏度直流测速发电机

永磁式高灵敏度直流测速发电机的结构特点是直径大、轴向尺寸小、电枢元件数多，因而输出电压斜率大、低速精度高，其灵敏度比普通测速发电机高出一千多倍。它的换向器是用塑料或绝缘材料制成薄板基体，在其上面印制很多换向片。换向器是固定在轴的端面上，故称之为印制电路端面换向器。由于这种电机刷间串联的元件数较多，因而纹波电压较低。它的转速可以很低，有的最低转速可低于每天一转，输出电压约为几毫伏。

由于这种电机能直接与低速伺服电动机连接，所以特别适合作为低速伺服系统中的速度检测元件。

二、无刷直流测速发电机

有刷直流测速发电机存在很多的缺点，如可靠性差、无线电干扰大、引起摩擦转矩、输出电压不稳定等。为此应大力开展对无刷直流测速发电机的研制，如霍尔无刷直流测速发电机，电子换向式无刷直流测速发电机，两极管式测速发电机等。下面介绍前两种的工作原理。

(一) 霍尔无刷直流测速发电机

1. 霍尔元件

如图 3-24 所示，在一块半导体薄片的相对两侧通入控制电流 I ，在薄片的垂直方向加以磁场 B ，则在半导体薄片的另外两侧会产生一个电动势，这一现象叫做霍尔效应。所产生的电动势叫霍尔电动势。该半导体薄片称为霍尔元件。

对厚度为 d 的霍尔元件，霍尔电动势的计算式

$$E_H = K_H IB \quad (3-21)$$

$$K_H = \frac{R_H}{d}$$

式中： K_H 为霍尔元件灵敏度； R_H 为霍尔系数。

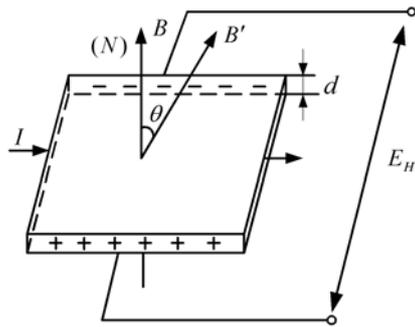


图 3-24 霍尔效应原理图

当磁场方向和元件的平面法线方向 N 成 θ 角度时，如图中 B' 。作用在元件上的有效磁通是其法线方向的分量，即为 $B' \cos \theta$ ，则霍尔电动势

$$E_H = K_H IB' \cos \theta \quad (3-22)$$

从式 (3-22) 可知，当控制电流或磁场方向改变时，霍尔电动势的方向也将随之改变。但同时改变控制电流和磁场的方向，则霍尔电动势的方向不变。

霍尔电动势可能是直流的，也可能是交流的。当磁场和控制电流都是直流时，霍尔电动势为直流电动势；若磁场和控制电流其中之一是交流的，霍尔电动势为交流电动势。

2. 霍尔无刷直流测速发电机的工作原理

如图 3-25 所示为霍尔无刷直流测速发电机的原理图，图 3-26 为它的接线图。在电机的定子铁芯上放置两个空间位置相差 90° 电角度的绕组 W_A 和 W_B ，并在绕组的轴线上放置有霍尔元件 H_B 和 H_A 。转子为两极永久磁钢。霍尔元件 H_A 和 H_B 的控制电流分别由定子绕组 W_A 和 W_B 供给。将霍尔元件的输出端串联，总的输出电压为两个霍尔元件的霍尔电动势之和。

当转子不转时，定子绕组 W_A 和 W_B 中都没有感应电动势，霍尔元件的控制电流都为零，所以霍尔电动势也为零。

当转子以 ω 的角速度旋转时，将在定子绕组 W_A 和 W_B 中产生感应电动势。设转子磁场处于图 3-25 所示的位置时 $\omega t = 0$ ，此时霍尔元件 H_A 处的磁通密度为最大。若气隙磁通密度按正弦规律分布，则磁通密度 B_A 应为

$$B_A = B_m \cos \omega t \quad (3-23)$$

式中： B_m 为气隙磁通密度的幅值。

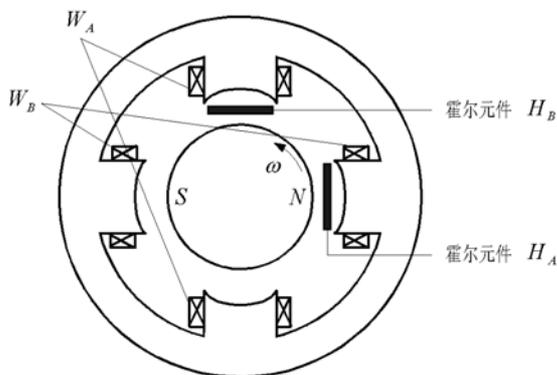


图 3-25 霍尔无刷直流测速发电机原理图

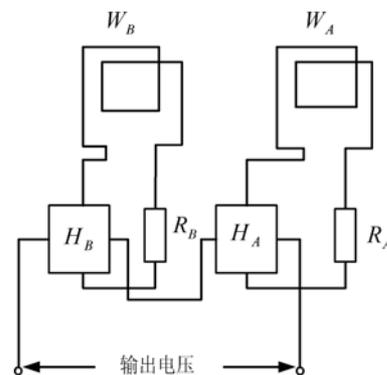


图 3-26 霍尔无刷直流测速发电机接线图

同理，通过霍尔元件 H_B 的磁通密度 B_B

$$B_B = B_m \sin \omega t \quad (3-24)$$

定子绕组 W_A 和 W_B 中的感应电动势分别为

$$\left. \begin{aligned} e_A &= K_A \frac{dB_B}{dt} = K_A B_m \omega \cos \omega t \\ e_B &= K_B \frac{dB_A}{dt} = -K_B B_m \omega \sin \omega t \end{aligned} \right\} \quad (3-25)$$

式中： K_A 、 K_B 为比例常数。

当略去控制电流回路中的漏阻抗，根据图 3-26，则控制电流分别为

$$\left. \begin{aligned} i_A &= \frac{e_A}{R_A} = \frac{K_A B_m}{R_A} \omega \cos \omega t \\ i_B &= \frac{e_B}{R_B} = -\frac{K_B B_m}{R_B} \omega \sin \omega t \end{aligned} \right\} \quad (3-26)$$

霍尔元件 H_A 和 H_B 的霍尔电动势分别为

$$\left. \begin{aligned} E_{HA} &= K_{HA} B_A i_A = \frac{K_{HA} K_A B_m^2}{R_A} \omega \cos^2 \omega t \\ E_{HB} &= K_{HB} B_B i_B = -\frac{K_{HB} K_B B_m^2}{R_B} \omega \sin^2 \omega t \end{aligned} \right\} \quad (3-27)$$

式中： K_{HA} 、 K_{HB} 分别为霍尔元件 H_A 和 H_B 的灵敏度。

调节 R_A 和 R_B 的大小，使

$$\frac{K_{HA} K_A B_m^2}{R_A} = \frac{K_{HB} K_B B_m^2}{R_B} = K$$

若将两个霍尔元件的输出端反向串联，则总的输出电压为

$$U_2 = E_{HA} - E_{HB} = K\omega(\cos^2 \omega t + \sin^2 \omega t) = K\omega \quad (3-28)$$

由式 (3-28) 可见，霍尔无刷直流测速发电机的输出电压为一正比于转速的直流电压。为了提高输出电压，有时在霍尔元件的输出端设置放大器；有时也采用多相对称绕组，放置有多个霍尔元件，采取适当的连接方法后，可使输出电压为

$$U_2 = \frac{m}{2} K\omega \quad (3-29)$$

式中： m 为绕组的相数。

这种测速发电机无剩余电压，输出电压中也不含脉动成份；转子摩擦转矩小、惯量小、寿命长、可靠性好、容易维护，所以近年来发展很快。

(二) 电子换向式无刷直流测速发电机

如图 3-27 为电子换向式无刷直流测速发电机的原理图。它是根据电磁感应定律，通过磁场的电磁作用产生交变感应电动势，然后经过电子换向电路转换成直流电压输出。测速机的转向不同，输出电压的极性也不同；电子换向电路的形式不同输出的直流测速信号也不同。这种测速电机的特点是不存在不灵敏区，没有电刷与换向器接触等所造成的缺陷，性能较好；但它的结构较复杂。

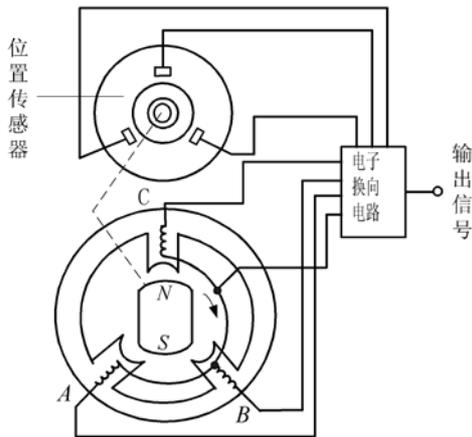


图 3-27 电子换向式无刷直流测速发电机原理图

§ 3-5 测速发电机的应用举例

测速发电机在自动控制系统和计算装置中可以作为测速元件、校正元件、解算元件和角加速度信号元件。

一、转速自动调节系统

如图 3-28 所示为转速自动调节系统的方框图。测速发电机耦合在电动机轴上作为转速负反馈元件，其输出电压作为转速反馈信号送回到放大器的输入端。调节转速给定电压，系统可达到所要求的转速。当电动机的转速由于某种原因（如负载转矩增大）减小，此时测速发电机的输出电压减小，转速给定电压和测速反馈电压的差值增大，差值电压信号经放大器放大后，使电动机的电压增大，电动机开始加速，测速机输出的反馈电压增加，差值电压信号减小，直到近似达到所要求的转速为止。同理，若电动机的转速由于某种原因（如负载转矩减小）增加，测速发电机的输出电压增加，转速给定电压和测速反馈电压的差值减小，差值信号经放大器放大后，使电动机的电压减小，电动机开始减速，直到近似达到所要求的转速为止。通过以上分析可以了解到，只要系统转速给定电压不变，无论由于何种原因企图改变电动机的转速，由于测速发电机输出电压反馈的作用，使系统能自动调节到所要求的转速（有一定的误差，近似于恒速）。

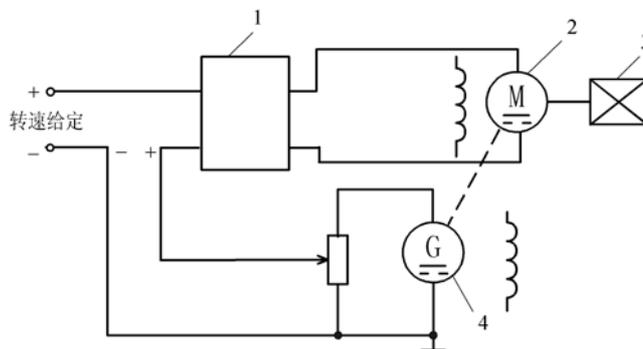


图 3-28 转速自动调节系统原理图

1—放大器；2—电动机；3—负载；4—测速发电机

二、位置伺服控制系统的速度阻尼及校正

位置伺服控制系统又称随动控制系统，图 3-29 表示模拟式随动系统。在直流伺服电动机的轴上耦合一台直流测速发电机，测速发电机也作转速反馈元件，但其作用却不同于转速自动调节系统，该系统中转速反馈是用于位置的微分反馈的校正，起速度阻尼作用。

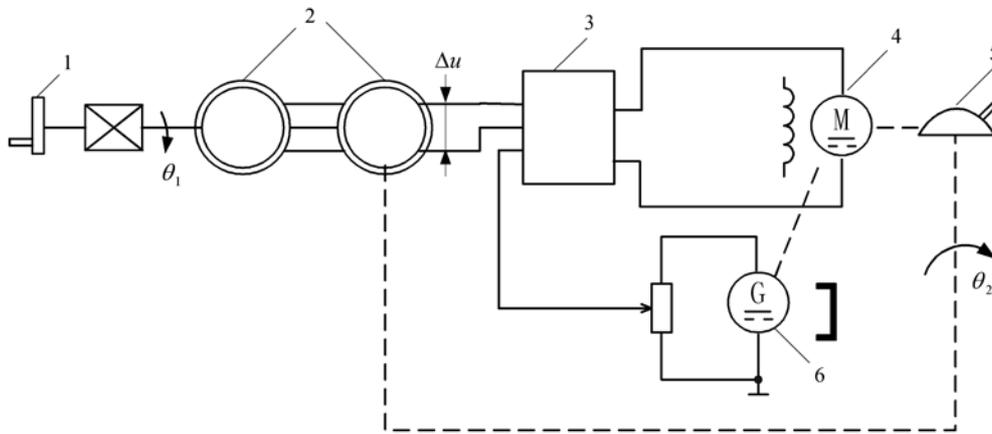


图 3-29 模拟式随动系统原理图

1—手轮；2—自整角机；3—放大器；4—直流伺服电动机；5—控制对象（火炮）；6—直流测速发电机

在不接测速发电机时，假如火炮手向某一方向摇动手轮，使自整角发送机和自整角接收机的转角 θ ($\theta_1 > \theta_2$) 不相等，产生失调角 θ ($\theta = \theta_1 - \theta_2$)，则自整角接收机输出一个与 θ 成正比的电压 $U = K_1 \theta$ (K_1 为比例系数)，经放大器放大，加到直流伺服电动机上。电动机带动火炮一起转动，此时自整角接收机也跟着一起转动，使 θ_2 增加， θ 值减小。当 $\theta_1 = \theta_2$ 时，虽然 $\theta = 0$ ， $U = 0$ ，但由于电动机和负载的惯性，在 $\theta_1 - \theta_2 = 0$ 的位置时其转速不为零，继续向 θ_2 增加的方向转动，使 $\theta_2 > \theta_1$ ， $\theta < 0$ ，自整角接收机输出电压的极性变反。在此电压的作用下，电动机由正转变为反转。同理电动机由反转也要变为正转，这样系统就产生了振荡。如果接上测速发电机，它输出一个与转速成正比的直流电压 $K_2 \frac{d\theta_2}{dt}$ ，并负反馈到放大器的输入端。当 $\theta_1 = \theta_2$ 时，由于 $\frac{d\theta_2}{dt} \neq 0$ ，测速发电机仍有电压输出，使放大器的输出电压极性与原来 ($\theta_1 > \theta_2$ 时) 的相反，此电压使电动机制动，因而电动机就很快地停留在 $\theta_1 = \theta_2$ 的位置。可见，由于系统中加入了测速发电机，就使得由电动机及其负载的惯性所造成的振荡受到了阻尼，从而改善了系统的动态性能。

三、自动控制系统的解算

测速发电机作为控制系统中的解算元件，既可用作积分元件，也可用作微分元件。

1. 作积分运算

图 3-30 为测速发电机作积分运算的原理图。 U_1 为输入信号，电位器的输出电压 U_2 为输出信号， U_2 与其转角 θ 成正比。当输入信号 $U_1 = 0$ 时，伺服电动机不转，电位器的转角 $\theta = 0$ ，输出电压 $U_2 = 0$ 。当施加一个输入信号，伺服电动机带动测速发电机和电位器转动，将有

$$\left. \begin{aligned} U_2 &= K_1 \theta \\ \theta &= K_2 \int_0^{t_1} n dt \\ U_f &= K_3 n \end{aligned} \right\} \quad (3-30)$$

式中： K_1 、 K_2 、 K_3 为比例常数，由系统内各环节的结构和参数所决定； n 为伺服电动机转速。

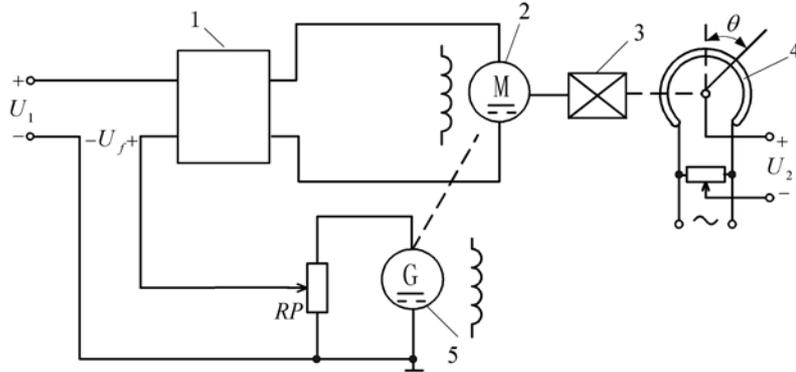


图 3-30 测速发电机作积分运算的原理图

1—放大器；2—直流伺服电动机；3—传动机构；4—电位器；5—测速发电机

只要放大器的放大倍数足够大，则

$$U_1 \approx U_f \quad (3-31)$$

$$U_2 = K_1 \theta = K_1 K_2 \int_0^{t_1} n dt = \frac{K_1 K_2}{K_3} \int_0^{t_1} U_f dt = K \int_0^{t_1} U_1 dt \quad (3-32)$$

可见，输出电压 U_2 正比于输入电压 U_1 从 0 到 t_1 时间内的积分。

2. 作微分运算：

图 3-31 是利用测速发电机实现微分运算的原理图。测速发电机 G_1 和 G_2 ，在励磁电压保持不变时，它们的输出电压为

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= K_1 \omega_1 \\ U_2 &= K_2 \omega_2 \end{aligned} \right\} \quad (3-33)$$

式中： K_1 、 K_2 为比例常数。

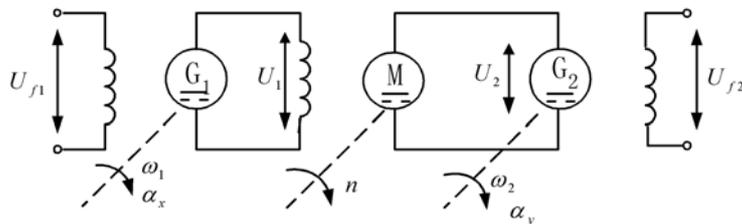


图 3-31 测速发电机作微分运算的原理图

将 U_1 和 U_2 分别作为电动机 M 的励磁电压和电枢电压，在略去电动机电枢回路电阻时

$$U_2 \propto \Phi n \propto U_1 n \propto U_1 \omega \quad (3-34)$$

设测速发电机 G_1 和 G_2 的输入信号，即转角 $\alpha_x = \alpha_x(t)$ 和 $\alpha_y = \alpha_y(t)$ 分别正比于参量 $X(t)$ 和 $Y(t)$ 。则

$$\omega_1 = \frac{d\alpha_x}{dt} \quad \omega_2 = \frac{d\alpha_y}{dt} \quad (3-35)$$

$$n \propto \omega \propto \frac{U_2}{U_1} \propto \frac{K_2 \omega_2}{K_1 \omega_1} \propto \frac{K_2}{K_1} \frac{\frac{d\alpha_y}{dt}}{\frac{d\alpha_x}{dt}} \propto \frac{K_2}{K_1} \frac{d\alpha_y}{d\alpha_x} \quad (3-36)$$

因此

$$n = K \frac{dY}{dX} \quad (3-37)$$

式中： K 为比例常数。

上式可见，电动机的输出转速为两个输入参量之间的微分运算。

小 结

测速发电机是自动控制系统中的信号元件，它可以把转速信号转换成电气信号。

直流测速发电机是一种微型直流发电机，按励磁方式分为电磁式和永磁式两大类。在理想情况下，输出特性为一条直线，而实际上输出特性与直线有误差。引起误差的主要原因是：电枢反应的去磁作用，电刷与换向器的接触压降，电刷偏离几何中性线，温度的影响等。因此，在使用时必须注意电机的转速不得超过规定的最高转速，负载电阻不小于给定值。在精度要求严格的场合，还需要对测速机进行温度补偿。纹波电压造成了输出电压不稳定，降低了测速发电机的精度。

异步测速发电机的结构与空心杯转子交流伺服电动机完全相同。当异步测速发电机的励磁绕组产生的磁通 $\dot{\Phi}_d$ 保持不变，转子不转时输出电压为零，转子旋转时切割励磁磁通产生感应电动势和电流，建立横轴方向的磁通，在输出绕组中产生感应电动势，从而产生输出电压。输出电压的大小与转速成正比，但其频率与转速无关，等于电源的频率。理想的输出特性也是一条直线，但实际上并非如此。引起误差的主要原因是： $\dot{\Phi}_d$ 的大小和相位都随着转速而变化，负载阻抗的大小和性质，励磁电源的性能，温度以及剩余电压，其中剩余电压是误差的主要部分。

表征异步测速发电机性能的主要技术指标有线性误差、相位误差和剩余电压。

引起剩余电压的原因很多，如磁路不对称、气隙不均匀、输出绕组和励磁绕组在空间不是严格相差 90° 电角度、绕组匝间短路、铁芯片间短路、转子杯材料和厚度不均匀以及寄生电容的存在等等。在控制系统中，剩余电压的同相分量引起系统误差，正交和高次谐波分量将使放大器饱和。消除剩余电压的方法很多，除了改进电机的制造材料和工艺外，还可采用外接补偿装置。

在实际中为了提高异步测速发电机的性能通常采用四极电机。为了减小误差，应增大转子电阻和负载阻抗，减小励磁绕组和输出绕组的漏阻抗，提高励磁电源的频率（采用 400Hz 的中频励磁电源）。使用时电机的工作转速不应超过规定的转速范围。

为了满足控制系统的要求，对测速发电机的性能要求也越来越高。为此人们在普通测速发电机的基础上，研制出了永磁高灵敏度直流测速发电机和无刷直流测速发电机。

测速发电机在自动控制系统中是一个非常重要的元件，它可作为校正元件、阻尼元件、测量元件、解算元件和角加速度信号元件等。

思考题与习题

1. 直流测速发电机按励磁方式分有哪几种？各有什么特点？
2. 直流测速发电机的输出特性，在什么条件下是线性特性？产生误差的原因和改进的方法是什么？
3. 为什么直流测速发电机在使用时转速不宜超过规定的最高转速？而负载电阻不能小于规定值？
4. 若直流测速发电机的电刷没有放在几何中性线的位置上，试问此时电机正、反转时的输出特性是否一样？为什么？
5. 为什么异步测速发电机的转子都用非磁性空心杯结构，而不用鼠笼式结构？
6. 异步测速发电机的励磁绕组与输出绕组在空间位置上互差 90° 电角度，没有磁路的耦合作用。为什么励磁绕组接交流电源，电机转子转动时，输出绕组会产生电压？为何输出电压的频率却与转速无关？若把输出绕组移到与励磁绕组在同一轴线上，电机工作时，输出绕组的输出电压有多大？与转速有关吗？
7. 异步测速发电机输出特性存在线性误差的主要原因有哪些？怎样确定线性误差的大小？
8. 为什么异步测速发电机的励磁电源大多采用 400Hz 的中频电源？
9. 什么是异步测速发电机的剩余电压？各个分量的含义和产生的原因以及对系统的影响是什么？如何减小？
10. 当异步测速发电机接纯电容负载时，试证明
当负载容抗 $X_c = \frac{R_2^2 + X_2^2}{X_2}$ 时，输出电压有最大值，即 $U_{2m} = E_2 \sqrt{1 + \left(\frac{X_2}{R_2}\right)^2}$ 。
11. 简述霍尔无刷直流测速发电机的工作原理，并说明为什么输出电压不含脉动成分？而且也无剩余电压？
12. 试说明异步测速发电机作角加速度元件时的工作原理。