

第3章

自整角机

自整角机是一种将转角转换成电压信号或将电压信号转换成转角,以实现角度数据的远距离传输、变换和指示的元件,达到自动指示角度、位置、距离和指令的目的。它可以用于测量或控制远距离设备的角度位置,也可以在随动系统中用作机械设备之间的角度联动装置,使机械上互不相连的两根或两根以上转轴保持同步偏转或旋转。自整角机广泛应用于钢铁生产自动线中轧制、卷机系统、航海等位置和方位同步指示系统和火炮、雷达等控制系统中,通常是两台或两台以上组合使用。

自整角机是感应型的机电元件,是利用自整步特性将转角变为交流电压或由转角变为转角的感应式微型电机。通常系统中两台或多台自整角机组合使用,通过电路上的联系,使机械上互不相连的两根或多根转轴自动地保持相同的转角变化,或同步旋转,电机的这种性能称为自整步特性。

自整角机的基本结构与一般的电动机相似,定、转子铁芯上嵌有绕组,通过绕组和磁路的设计,使定子、转子绕组之间的互感随转子转角成正弦变化。借助原、副绕组之间的电和磁的作用,在自整角机转轴上产生同步力矩,或者在自整角机副绕组中输出电气信号。自整角机在结构上与绕线式异步电机类似,但其本质及作用原理不同。

3.1 自整角机的分类和结构

3.1.1

自整角机的分类

按照电源相数不同,自整角机可分为单相自整角机和三相自整角机两类。单相自整角机励磁绕组由单相电源供电,常用的电源频率通常有 50Hz 和 400Hz 两种。由于单相自整角机的精度高、旋转平滑、运行可靠,因而在小功率系统中应用较广。自动控制系统中所使用的自整角机一般均为单相。三相自整角机亦称功率自整角机,其励磁绕组由三相电源供电,多用于功率较大的场合,即所谓电轴系统中,例如,用于钢铁生产自动线中轧制、卷机系统中。以下所述自整角机均指单相自整角机。

自整角机按其工作原理的不同,可以分为力矩式自整角机和控制式自整角机两类,它们的外观如图 3-1 所示。

力矩式自整角机主要用在同步指示系统中。这类自整角机本身不能放大力矩,要带动接收机轴上的机械负载,必须由自整角发送机一方的驱动元件供给能量。因此,可以认为力矩式自整角机系统是通过一个弹性连接的、能在一定距离内扭转的轴来带动负载的。力矩式自整角机系统为开环型,适合对角度传输精度要求不是很高的控制系统,例如,远距离指



图 3-1 自整角机外观图

示液面的高度、阀门的开度、电梯和矿井提升机的位置、变压器的分度开关位置等。

力矩式自整角机按其用途可分为以下 4 种。

(1) 力矩式发送机(代号 ZLF): 主要用来与力矩式差动发送机、力矩式接收机一起工作,其作用是将转子转角的变化转变为电信号输出。

(2) 力矩式差动发送机(代号 ZCF): 串接在力矩发送机与接收机之间,将发送机转角及自身转角的和(或差)转变为电信号,输送到接收机。

(3) 力矩式接收机(代号 ZLJ): 主要用来与力矩式发送机及力矩式差动发送机一起工作。其定子接收发送来的电气信号,转子励磁后即能自动地转到对应于定子上所接收的电气信号角度的位置。

(4) 力矩式差动接收机(代号 ZCJ): 主要用来与两个力矩式发送机一起工作,接收电信号,并使自身转子转角为两发送机转角的和(或差)。

控制式自整角机主要用于由自整角机和伺服机构组成的随动系统,一般作检测元件用。控制式自整角机按其用途可分为以下 3 种。

(1) 控制式发送机(代号 ZKF): 将转子转角变换成电信号输出,与控制式变压器或控制式差动发送机一起工作。

(2) 控制式自整角变压器(代号 ZKB): 也就是控制式接收机,主要用来与控制式发送机及控制式差动发送机一起工作。其定子接收由控制式发送机或控制式差动发送机传输来的电气角度信号。转子的输出电压正比于失调角(输入电气角度与控制式变压器转子角度之差)的正弦函数。

(3) 控制式差动发送机(代号 ZKC): 串接于发送机与变压器之间,其作用原理类似于力矩式差动发送机,将发送机转角及自身转角的和(或差)转变为电信号,输送到自整角变压器。

控制式自整角机系统为闭环系统,应用于负载较大及精度要求高的随动系统。控制式自整角机系统的基本连接回路如图 3-2 所示。图中控制式变压器的输出电压经放大器 A 放大后,作为伺服电动机的控制信号,使伺服电动机旋转。伺服电动机旋转时带动自整角变压器的转轴,使其转动到与自整角发送机相应的协调位置。

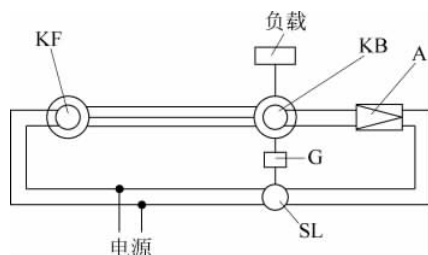


图 3-2 控制式自整角机伺服系统的基本回路

KF—控制发送机 KB—控制变压器 A—放大器 G—减速齿轮 SL—伺服电动机

此外,还有具有双重用途的自整角机,兼作控制变压器和力矩式接收机,称为控制力矩式自整角机。

3.1.2

自整角机的结构

自整角机按结构的不同可分为接触式和无接触式两大类。无接触式没有电刷、滑环的滑动接触,具有可靠性高、寿命长、没有电磁辐射等优点,缺点是结构复杂、电气性能较差。接触式自整角机的结构比较简单,性能较好,我国自行设计的自整角机系列中各电机均为接触式自整角机,其特点为封闭式、单轴式。采用封闭式结构可以防止因机械撞击及电刷、滑环污染而造成接触不良对性能的影响,适用于较为恶劣的环境。以我国自行设计的 KL 系列自整角机为例,该系列共有 12、20、28、36、45、55、70、90 八个机座号(机座号表示机壳外径尺寸,单位 mm;但 12 号机座除外,12 号机座外径为 12.5mm)。

按机座号大小不同,KL 系列自整角机结构类型有两种:一种为“一刀通”式结构,另一种为装配式结构,分别如图 3-3、图 3-4 所示。“一刀通”式结构是指定子内径与轴承室为同一尺寸,因此可以一次装配加工。其主要优点是定子、转子的同心度较高;缺点是由于采用了环氧树脂封装灌注,定子与机壳、端盖成为牢固的一体,难以互换。“一刀通”式结构主要用于机座号较小(20 号以下)的电机,装配式结构则用于机座号较大(20 号以上)的电机。

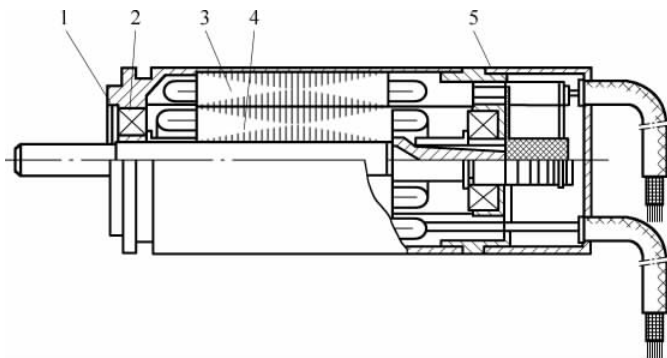


图 3-3 “一刀通”式结构

1—挡圈 2—轴承 3—定子 4—转子 5—端罩

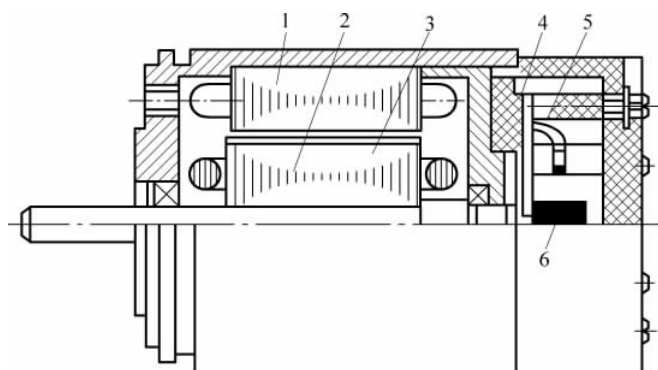


图 3-4 装配式结构示意图

1—定子 2—转子 3—阻尼绕组 4—电刷 5—接线柱 6—集电环

自整角机主要部件的结构如图 3-5 所示。

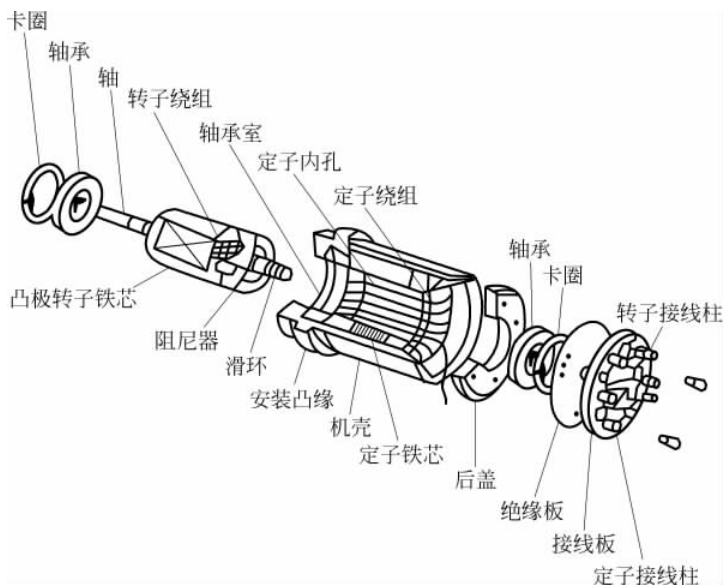


图 3-5 自整角机主要结构部件

1. 机壳

机壳材料有硬铝合金和不锈钢两种。小机座号的自整角机一般采用不锈钢做机壳。小机座自整角机的机壳壁薄,要求材料具有较高的机械强度,不锈钢的机械强度抗腐蚀性能优于铝合金。但不锈钢的加工比较困难,成本较高。一般 12 #、20 # 机座自整角机采用不锈钢机壳,36 # 机座以上自整角机采用硬铝合金机壳,28 # 自整角机机壳可以采用不锈钢,也可用硬铝合金。机壳按形状来分,有杯形和筒形两种。杯形机壳可以不用前端盖(轴伸端的端盖叫前端盖),但其加工比一般的筒形机壳困难。

2. 定子

定子由铁芯和绕组组成。定子铁芯由定子冲片经涂漆、涂胶叠装而成。为了充分利用

轴向长度,铁芯两端可以不用绝缘端板,而在铁芯的两端面上涂以电阻磁漆达到绝缘的目的。力矩式自整角机的定子冲片采用高导磁率、低损耗的硅钢薄板。控制式自整角机由于有零位电压和电气精度的要求,定子冲片以采用磁化曲线线性度好、损耗低、导磁率高的铁镍软磁合金为好,也可采用符合上述要求的硅钢薄板材料,如 DG41。

无论控制式或力矩式自整角机,定子铁芯总是做成隐极式的,以便将三相同步绕组布置在定子上。在装配式结构中,绕组需浸环氧树脂漆或其他绝缘漆。

3. 转子

自整角机的转子铁芯有凸极式和隐极式两种。凸极转子结构与凸极同步电机转子相似。但在自整角机中均为两极,形状则与哑铃相似,以保证在 360° 范围内能够自动同步的要求。隐极式转子结构与绕线式异步电机相似。转子铁芯导磁材料选用的原则与定子铁芯相同。力矩式自整角机凸极式转子冲片可以采用有方向性的冷轧硅钢薄板,以提高纵轴方向的导磁率,降低横轴方向的导磁率。

自整角机转子采用凸极或隐极结构,应视其性能要求而定,一般可按下列原则考虑。

(1) 控制式自整角发送机:要求输出阻抗低,采用凸极式结构较好。发送机的精度主要取决于副方,原方采用凸极或隐极对其电气精度影响不大。

(2) 差动式自整角机:由于原、副方均要求布置三相绕组,无疑应采用隐极结构。

(3) 自整角变压器:由于转子上的单相绕组为输出绕组,为了提高电气精度、降低零位电压,采用隐极以便布置高精度的绕组。在精度及零位电压要求不高的条件下,凸极转子结构的自整角机也可作为自整角变压器使用。自整角变压器采用隐极结构可以降低从发送机取用的励磁电流,有利于多个自整角变压器与控制式发送机的并联工作。

(4) 力矩式自整角机:因为有比力矩和阻尼时间的要求,采用凸极式或隐极式转子结构,应视其横轴参数配合是否合理而定。小机座号(45#以下)的工频和中频自整角机一般采用凸极结构。大机座号(70#以上)的工频自整角机可以采用凸极结构,中频自整角机则有可能采用隐极结构。

3.2 控制式自整角机

在随动系统中广泛采用了由伺服机构和控制式自整角机组合的结构。有时是一台发送机对应控制一台接收机,有时需要由两台发送机来控制一台接收机,此时接收机可以指示出两台发送机转子偏转角度的和或差,这种情况下就要使用差动自整角发送机。本节分别介绍控制式自整角机中的发送机、接收机、差动发送机的工作原理。

3.2.1

控制式自整角机的工作原理

以控制式自整角机发送机和接收机成对运行为例来进行分析,如图 3-6 所示。其基本功能是发送机将转子上的位置信号转化为电信号,接收机定子接收由发送机传输来的电气角度信号,接收机的转子上输出相对应的感应电动势。该感应电动势通常接到放大器的输

入端,经过放大后再加到伺服电动机的控制绕组,用来驱动负载转动,同时伺服电动机还经过减速装置带动接收机的转子随同负载一起转动,使接收机的输出电压减小,当达到协调位置时,接收机的输出电压为零,伺服电动机停止转动。

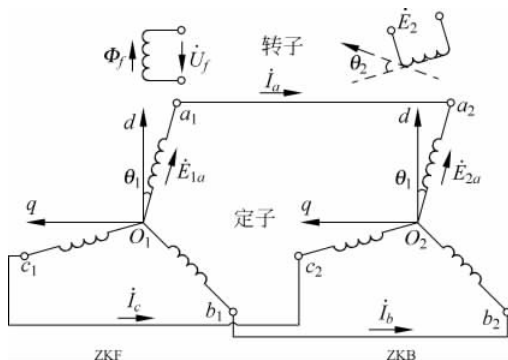


图 3-6 控制式自整角机工作原理图

图中左边为自整角机发送机(ZKF),右边为自整角机接收机(ZKB,也称为自整角变压器);ZKF 的转子绕组接交流电压 U_f ,称为励磁绕组;ZKF 的转子与被检测装置的位置发送轴连接在一起;ZKF 和 ZKB 的定子绕组引线端 $a_1b_1c_1$ 和 $a_2b_2c_2$ 对应连接,被称为同步绕组或整步绕组;ZKB 的转子绕组向外输出感应电动势,故称之为输出绕组。

若 ZKF 定子 a_1 相绕组轴线与励磁绕组轴线之间的夹角为 θ_1 ,即 ZKF 转子的位置角,ZKB 定子 a_2 相绕组轴线与励磁绕组轴线之间的夹角也为 θ_1 ;ZKF 定子 a_1 相绕组轴线与励磁绕组轴线重合的位置叫做基准零位, a_1 相为基准相;把 ZKF 和 ZKB 的转子绕组互相垂直的位置作为协调位置,定义输出绕组轴线与 a_1 相绕组轴线的垂直线之间的夹角为 ZKB 的转子位置角,如图中 θ_2 ;并规定逆时针方向转角为正,两个转子的位置角之差($\theta_1 - \theta_2$)称为失调角。

为了分析方便,我们做如下假定。

- (1) 电机磁路不饱和;
- (2) 励磁电压 U_f 为时间的正弦函数;
- (3) 气隙磁密为空间的正弦函数;
- (4) 发送机与接收机为完全相同的两台电机。

1. 控制式自整角发送机的工作原理

当发送机的励磁绕组接通交流电源后,便产生一个在其轴线上脉振的磁通 Φ 。由于 Φ 的变化,在定子三相绕组中感应出电动势。显然,定子三相绕组中电动势在时间上同相位,其大小与绕组所在空间位置 θ_1 有关,其有效值为

$$\begin{aligned} E_{1a} &= E_m \cos \theta_1 \\ E_{1b} &= E_m \cos(\theta_1 - 120^\circ) \\ E_{1c} &= E_m \cos(\theta_1 + 120^\circ) \end{aligned} \quad (3-1)$$

式中, E_m 为定子某相绕组轴线和励磁绕组轴线重合时该相绕组中的感应电动势,即定子绕组的最大相电动势; $E_m = 4.44fW\Phi_m$, 其中 W 为定子绕组每一相的有效匝数, Φ_m 为脉振磁

场每极磁通的幅值。

由于发送机和接收机定子相互连接,因此这些电动势必定要在定子绕组中形成电流。为了计算各相电流,暂将两个星形中点 O_1 、 O_2 连接起来,这样,各相回路显而易见,3 个回路中的电流为

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{E_{1a}}{Z_Z} = \frac{E_m \cos \theta_1}{Z_Z} = I_m \cos \theta_1 \\ I_b &= \frac{E_{1b}}{Z_Z} = \frac{E_m \cos(\theta_1 - 120^\circ)}{Z_Z} = I_m \cos(\theta_1 - 120^\circ) \\ I_c &= \frac{E_{1c}}{Z_Z} = \frac{E_m \cos(\theta_1 + 120^\circ)}{Z_Z} = I_m \cos(\theta_1 + 120^\circ) \end{aligned} \quad (3-2)$$

式中, $Z_Z = Z_F + Z_B + Z_i$, 即发送机、接收机定子每相阻抗及连接线阻抗(实际应用中连接线比较长)的和; $I_m = E_m / Z_Z$ 为励磁绕组轴线和定子绕组轴线重合时定子某相电流的有效值,即每相的最大电流有效值。

流经中线 $O_1 O_2$ 的电流 I_o 应该为 3 个电流之和,即

$$I_o = I_a + I_b + I_c = I_m \cos \theta_1 + I_m \cos(\theta_1 - 120^\circ) + I_m \cos(\theta_1 + 120^\circ) = 0 \quad (3-3)$$

可见,中线上没有电流,故两定子三相绕组的中点之间不必用导线连接。

定子绕组各相电流均产生两极的脉振磁场,该磁场的幅值位置就在各相绕组的轴线上,脉振磁通的交变频率等于定子绕组电流的频率。上述电流在 ZKF 和 ZKB 的定子绕组内流过时,将各自产生磁势。对应的 3 个磁势在时间上同相位,空间相差 120° 。由发送机定子绕组产生的磁势为

$$\begin{aligned} F_{1a} &= F_m \cos \theta_1 \\ F_{1b} &= F_m \cos(\theta_1 - 120^\circ) \\ F_{1c} &= F_m \cos(\theta_1 + 120^\circ) \end{aligned} \quad (3-4)$$

根据交流电机理论可知,分布绕组磁势的基波分量的幅值为

$$F_m = \frac{2}{\pi} \sqrt{2} W K_w I_m \quad (3-5)$$

式中, K_w 为分布绕组的绕组系数。

各相脉振磁场在时间上同相位,但幅值各不相同,与转子的位置有关。下面,通过磁势的分解与合成,求出发送机定子的合成磁势。

如图 3-7 所示,为了方便,取 ZKF 励磁绕组轴线方向为 d 轴,作 q 轴使之与 d 轴正交,并将发送机定子绕组各相磁势即 F_{1a} 、 F_{1b} 、 F_{1c} 分解成 d 轴分量和 q 轴分量,然后再合成。

$$\begin{aligned} F_{1ad} &= F_{1a} \cos \theta_1 \\ F_{1bd} &= F_{1b} \cos(\theta_1 - 120^\circ) \\ F_{1cd} &= F_{1c} \cos(\theta_1 + 120^\circ) \\ F_{1aq} &= F_{1a} \sin \theta_1 \\ F_{1bq} &= F_{1b} \sin(\theta_1 - 120^\circ) \\ F_{1cq} &= F_{1c} \sin(\theta_1 + 120^\circ) \end{aligned} \quad (3-6)$$

考虑磁势瞬时值与有效值的关系为 $f_1 = F_1 \sin \omega t$, 就能得到 d 轴方向和 q 轴方向的总磁势的瞬时值,即

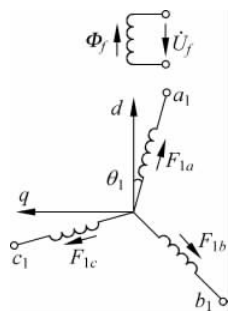


图 3-7 ZKF 定子磁场的分解与合成

$$f_{1d} = (F_{1ad} + F_{1bd} + F_{1cd}) \sin \omega t = F_m [\cos^2 \theta_1 + \cos^2(\theta_1 - 120^\circ) + \cos^2(\theta_1 + 120^\circ)] \sin \omega t = \frac{3}{2} F_m \sin \omega t \quad (3-7)$$

$$f_{1q} = (F_{1aq} + F_{1bq} + F_{1cq}) \sin \omega t = F_m [\cos \theta_1 \sin \theta_1 + \cos(\theta_1 - 120^\circ) \sin(\theta_1 - 120^\circ) + \cos(\theta_1 + 120^\circ) \sin(\theta_1 + 120^\circ)] \sin \omega t = 0$$

以上分析说明 ZKF 定子合成磁场仍为脉振磁场,且有以下特点。

(1) 合成磁场在 d 轴方向,即在励磁绕组轴线上;由于励磁绕组轴线和定子 a_1 相轴线的夹角为 θ_1 ,因而定子合成磁势 F_1 的轴线与 a_1 相轴线的夹角也为 θ_1 。

(2) 由于合成磁场的位置在空间固定不变,其大小又是时间的正弦函数,所以合成磁场是一个脉振磁场。

(3) 合成磁势的幅值恒为 $3F_m/2$,它与励磁绕组轴线相对于定子的位置 θ_1 无关。

从物理本质上来看,ZKF 定子合成磁场轴线之所以在励磁绕组轴线上,是由于定子三相绕组是对称的(接收机定子三相绕组作为它的对称感性负载)。如果把 ZKF 励磁绕组作为初级,定子三相绕组作为次级,两侧的电磁关系类似一台变压器。因此,可以推想,ZKF 定子合成磁势 F_1 必定对励磁磁场起去磁作用。当励磁电流的瞬时值增加时,ZKF 定子合成磁势的方向必定与励磁磁场的方向相反,如图 3-8 所示。

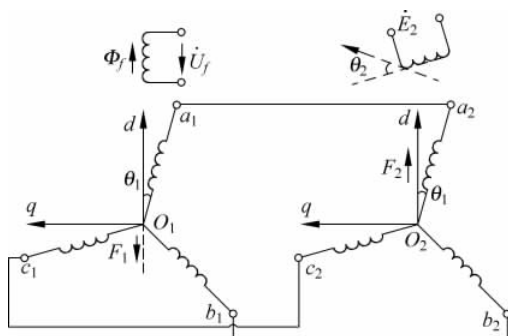


图 3-8 控制式自整角机发送机、接收机定子合成磁势

2. 控制式自整角接收机的工作原理

下面研究接收机 ZKB 中的磁场。当电流流过 ZKB 定子绕组时,在 ZKB 气隙中同样也要产生一个合成的脉振磁场。由于两机之间的定子绕组按相序对应连接,因此各对应的电流应该是大小相等、方向相反,接收机的定子绕组也是三相对称的。所以 ZKB 定子合成磁势 F_2 的轴线与 a_2 相轴线的夹角也为 θ_1 ,但方向与 ZKF 定子合成磁势的方向相反,如图 3-8 所示。

已知 ZKB 输出绕组轴线与 a_1 相或 a_2 相轴线之间的夹角为 $90^\circ + \theta_2$,因而 ZKB 定子合成磁场与输出绕组轴线之间的夹角为 $90^\circ + \theta_2 - \theta_1$ 。这也是 ZKF 励磁绕组与 ZKB 输出绕组轴线的夹角。合成脉振磁场在输出绕组中感应出电动势 e_2 ,其有效值 E_2 为

$$E_2 = E_{2m} \cos(90^\circ + \theta_2 - \theta_1) = E_{2m} \sin(\theta_1 - \theta_2) = E_{2m} \sin \delta \quad (3-8)$$

式中, δ 为失调角, $\delta = \theta_1 - \theta_2$; E_{2m} 为定子合成磁场轴线与输出绕组轴线一致时感应电动势

的有效值。

由上式可以看出,输出电动势与发送机或接收机本身的位置角 θ_1 和 θ_2 无关,而与失调角 δ 的正弦函数成正比,其相应的曲线如图 3-9 所示。

由图可以看出,在 $0 < \delta < 90^\circ$ 范围内,失调角愈大,则输出电动势也愈大; $\delta = 90^\circ$ 时,输出电动势达最大值;而当 $\delta > 90^\circ$ 后,输出电动势随 δ 角增大反而减小;至 $\delta = 180^\circ$ 时,输出电动势又变为零;此外,在 δ 角为负时,输出电动势反相。

当失调角 δ 很小时,可近似认为 $\sin\delta = \delta$,这样 $E_2 = E_{2m}\delta$,当 $\delta \leq 10^\circ$ 时,所造成的误差不超过 0.6%。因此,可以把失调角 δ 很小时的输出电动势看作与失调角成正比。这样,输出电动势的大小就反映了发送机轴与接收机轴转角差值的大小。

一般同步角位移传动系统中,采用自控式自整角机系统,其工作原理是发送机将位移信号(转子位置)经自整角变压器输出电压信号,经放大后送给交流伺服电动机,由于接收机输出绕组接上放大器,因此可认为 $E_2 = E_{2m}\delta$; 伺服电动机再驱动较大负载,同时带动接收轴转动,以缩小或消除转角差值,实现了高精度、大负载转矩同步位移信号的传递。

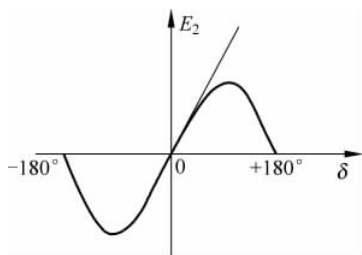


图 3-9 控制式自整角机输出电动势与失调角关系

3. 控制式自整角机的主要性能指标

控制式自整角机的主要性能指标有以下 4 条。

1) 零位电压

在一定励磁条件下,控制式自整角机的发送机和接收机位置协调时,其输出电动势在理论上应为零。但由于制造工艺和结构等原因,使输出电压不为零,此电压就称为零位电压。零位电压不仅影响系统的精度,而且会引起放大器的饱和、发热。因此,必须加以限制,使之尽量减小。一般零位电压在 50~180mV。

2) 比电压

当 δ 很小时, $E_2 = E_{2m}\delta$,即当失调角很小时,可以用正弦曲线在 $\delta = 0$ 处的切线来代替原曲线,如图 3-9 所示。这条切线的斜率就是所谓的比电压,其值等于在协调位置附近单位失调角所产生的输出电压。由图可以看出,比电压大,切线斜率大,即失调同样的角度所获得的信号电压大,因此系统的灵敏度就高。国产 ZKB 的比电压数值范围为 0.1~1V/度。

3) 输出相位移

自整角接收机输出电压的基波分量对自整角发送机励磁电压基波分量的时间相位差。它将直接影响到交流伺服电动机的移相措施。

4) 静态误差

自整角机回转速很低的工作状态叫静态。输出绕组的零位电压可以通过将接收机的转子转过一个小的角度而得到补偿,使补偿后零位电压为零(近似为零)。这一附加的转角表示了控制式自整角机的静态误差。静态误差决定了自整角机的精度等级。

根据静态误差,控制式自整角机的精度分为 3 级,如表 3-1 所示。

表 3-1 控制式自整角机的精度等级

精度等级	0 级	1 级	2 级
静态误差(小于)	± 5 角分	± 10 角分	± 20 角分

3.2.2

带有差动发送机的控制式自整角机的工作原理

当转角随动系统需要传递两个发送轴角度的和或差时,则需要采用差动自整角发送机,即在自整角发送机和接收机之间接上一个差动自整角发送机。图 3-10 为带有差动发送机的控制式自整角机工作原理图,从左到右依次为发送机 ZKF、差动发送机 ZKC、接收机 ZKB 以及放大器伺服电机等,差动发送机的定子、转子分别与普通自整角发送机的定子和接收机的定子对应连接, θ_1 和 θ_2 分别为两台发送机的转子与 D_1 相绕组轴线的夹角。

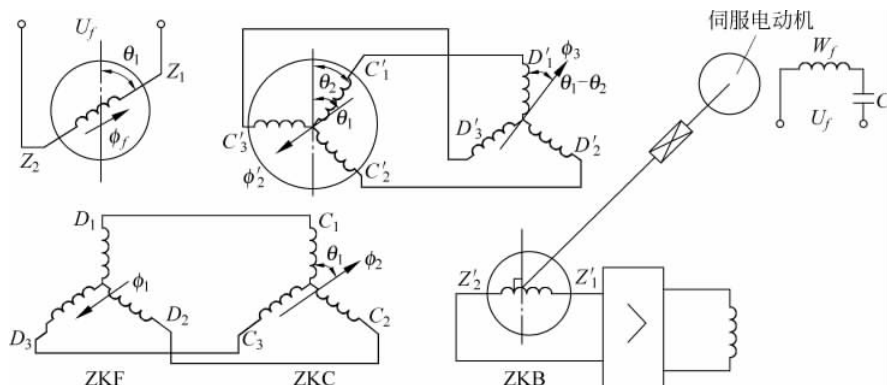


图 3-10 带有差动发送机的控制式自整角机工作原理图

当自整角发送机励磁绕组加上电压 U_f 后,在它的定子、ZKC 的定子、ZKC 的转子以及接收机的定子上产生的合成磁通分别为 ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ'_2 和 ϕ_3 。设初始状态为 $\theta_1 = \theta_2 = 0$,接收机输出绕组 $Z'_1 Z'_2$ 的轴线垂直于其定子 D'_1 相轴线,因此这时输出电动势为零。

如果自整角发送机转子输入 θ_1 角,ZKC 转子输入 θ_2 角。则 ZKC 定子绕组产生的合成磁通 ϕ_2 与定子 C_1 相轴线的夹角为 θ_1 。 ϕ_2 作为 ZKC 的励磁磁通,在它的转子三相绕组中产生感应电动势和电流,由于 ZKC 转子三相绕组是对称的,所以该电流产生的磁通 ϕ'_2 其方向与磁通 ϕ_2 的方向相反。由图 3-10 可知, ϕ'_2 与 C'_1 相轴线夹角为 $180^\circ + (\theta_1 - \theta_2)$ 。因为 ZKC 转子三相绕组和接收机定子三相绕组对应连接,所以它们对应的电流大小相等,方向相反。因此在接收机定子三相绕组中产生的磁通 ϕ_3 必定与 D'_1 相绕组轴线夹 $(\theta_1 - \theta_2)$ 角,作为接收机的励磁磁通 ϕ_3 与输出绕组 $Z'_1 Z'_2$ 的夹角为 $90^\circ - (\theta_1 - \theta_2)$,所以接收机输出绕组的电动势为

$$E_2 = E_{2m} \cos[90^\circ - (\theta_1 - \theta_2)] = E_{2m} \sin(\theta_1 - \theta_2) \quad (3-9)$$

同理,如果两发送机轴从初始位置向相反的方向分别转过 θ_1 和 θ_2 角,则接收机输出绕组的电动势为

$$E_2 = E_{2m} \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (3-10)$$

由于伺服系统的作用,故不管哪种情况,接收机转子将转过一对应角度,最后输出电动