

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。三相自整角机也称功率自整角机,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



图 3-1 自整角机外观图

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

器的转轴,使其转动到与自整角发送机相应的协调位置。

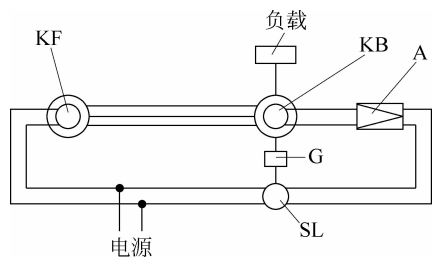


图 3-2 控制式自整角机伺服系统的基本回路

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。

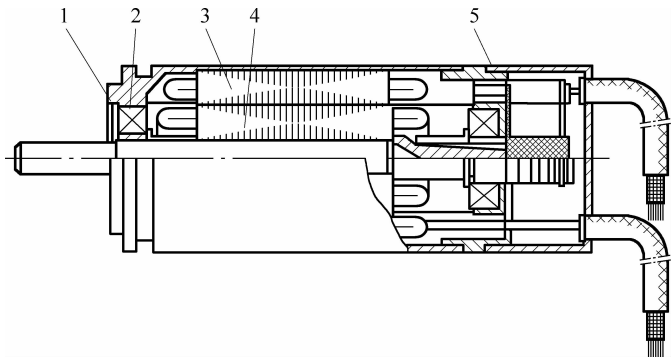


图 3-3 “一刀通”式结构

1—挡圈；2—轴承；3—定子；4—转子；5—端盖

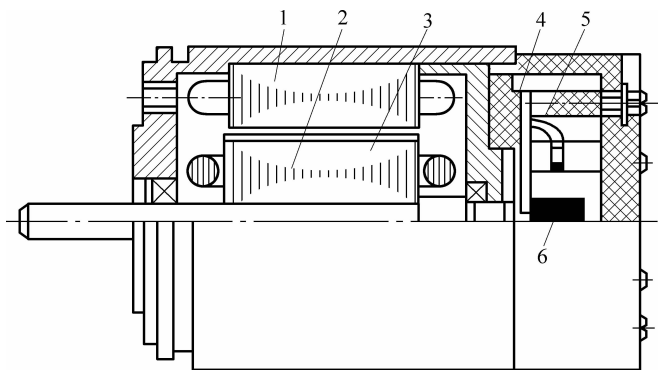


图 3-4 装配式结构示意图

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。

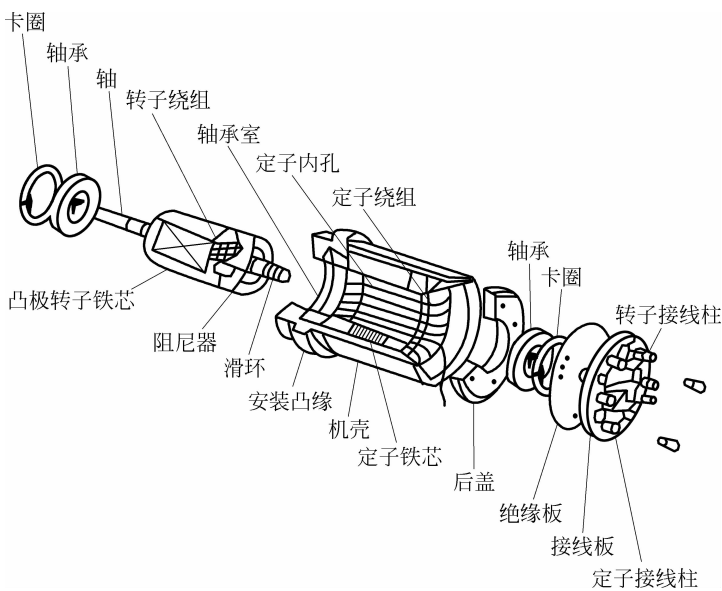


图 3-5 自整角机主要结构部件

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股采用不锈钢做机壳。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。

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。

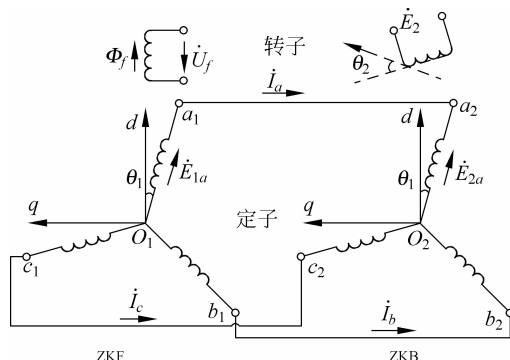


图 3-6 控制式自整角机工作原理图

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_1O_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。

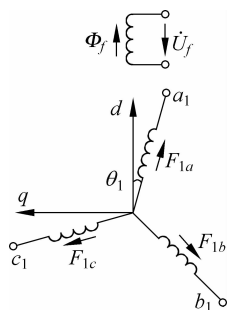


图 3-7 ZKF 定子磁场的分解与合成

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

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

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

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

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。

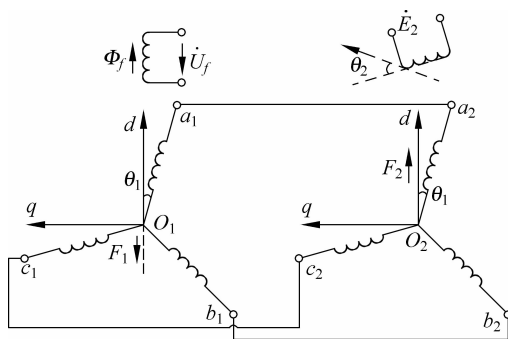


图 3-8 控制式自整角机发送机、接收机定子合成磁势

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

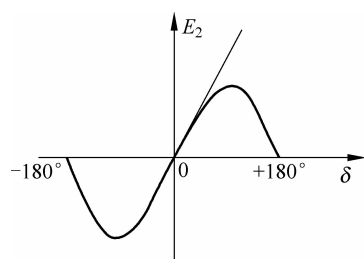


图 3-9 控制式自整角机输出
电动势与失调角关系

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 $\delta\ll 10^\circ$ 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。

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

自整角机回转速度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,使补做后零位电压为零(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。

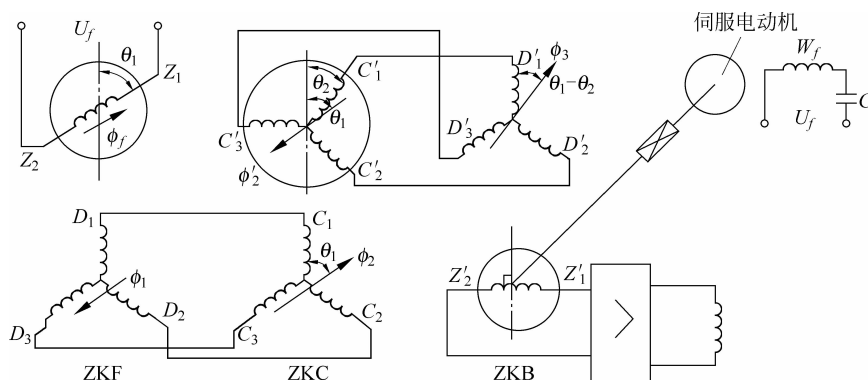


图 3-10 带有差动发送机的控制式自整角机工作原理图

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,最后输出电动势都为零。可见通过这样的一个系统可以实现两发送轴角度差或和的传递。

3.3 力矩式自整角机

在自动装置、遥测和遥控装置中,常需要在一定距离以外(特别是危险环境)监视和控制一些人无法接近的设备,以便了解它们的位置(例如,高度、深度、开启度等)和运行情况。在

这些情况下,就需要使用力矩式自整角机组成角度指示(传输)系统。本节分别介绍力矩式自整角机的工作原理及其阻尼绕组。

3.3.1 力矩式自整角机的工作原理

图 3-11 为力矩式自整角机的工作原理图。图中两台自整角机,左边为力矩式发送机 ZLF,右边为力矩式接收机 ZLJ。两机的单相励磁绕组接在同一电源上,其定子三相对称绕组按相序对应连接。

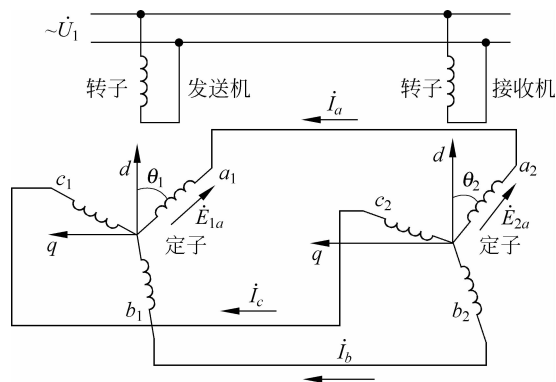


图 3-11 力矩式自整角机工作原理图

发送机的 a_1 相绕组轴线与其转子励磁绕组轴线之间的夹角为 θ_1 ；接收机的 a_2 相绕组轴线与其转子励磁绕组轴线之间的夹角为 θ_2 ；两自整角机的相对偏差角称为失调角为 δ ， $\delta = \theta_1 - \theta_2$ 。

为了分析简便,先做如下简化。

- (1) 假设一对自整角机的结构相同,参数一样;
- (2) 忽略磁路饱和的影响,忽略磁势和电动势中的高次谐波影响;
- (3) 假定自整角机气隙磁通密度按正弦规律分布;
- (4) 忽略电枢反应。

这样,在分析时就可应用叠加原理和矢量运算,分别考虑 ZLF 励磁磁场和 ZLJ 励磁磁场的作用。

1. 整步绕组的电动势、电流

自整角机的整步绕组为星形连接的三相绕组。当两机的励磁绕组均接上单相交流电源时,则分别在各自的气隙中形成一个正弦分布的脉振磁场,且分别在各自的三相定子绕组中感应出电动势。当失调角为零,即 $\theta_1 = \theta_2$,也就是两台自整角机转子位置角相同时,在转子单相交流脉振磁势的作用下,两台自整角机的整步绕组中将各自感应出电动势。由于参数和接线方式完全相同,两套整步绕组中所感应的线电动势大小相互抵消,导致各相整步绕组中的定子电流为零,相应的电磁转矩为零,两台自整角机将处于静止状态,此时转子的位置称为协调位置。

当 ZLF 转子在外力作用下逆时针旋转一个角度后,两自整角机转子之间的位置角 θ_1 和 θ_2 将不再相等,而是存在一个失调角 δ 。此时,ZLF 和 ZLJ 整步绕组中所感应的线电动

势将不再相等,两绕组之间便有均衡电流流过。均衡电流与两转子励磁绕组所建立的磁场相互作用便产生电磁转矩,又称为整步转矩。整步转矩力图使失调角 δ 趋向于零。由于 ZLF 转子与主令轴相接,不能任意转动,因此,整步转矩只能使 ZLJ 转子跟随 ZLF 转子转过 δ 角,从而使两转子的转角又保持一致。最终,整步转矩为零,系统进入新的协调位置。

由于两机的励磁绕组接于同一正弦交流电源(频率为 f),因此在两机的励磁绕组轴线方向存在时间相位相同的脉振磁场,分别以 Φ_F 和 Φ_J 表示。由此在 ZLF、ZLJ 定子绕组上感应出变压器电动势。ZLF 定子绕组感应电动势为

$$\begin{aligned} E_{1a} &= E \cos \theta_1 \\ E_{1b} &= E \cos(\theta_1 - 120^\circ) \\ E_{1c} &= E \cos(\theta_1 + 120^\circ) \end{aligned} \quad (3-11)$$

ZLJ 定子绕组感应电动势为

$$\begin{aligned} E_{2a} &= E \cos \theta_2 \\ E_{2b} &= E \cos(\theta_2 - 120^\circ) \\ E_{2c} &= E \cos(\theta_2 + 120^\circ) \end{aligned} \quad (3-12)$$

式中, E 为定子绕组轴线与励磁绕组轴线重合时定子绕组感应电动势的有效值,即两绕组轴线正向重合时该相整步绕组能获得的最大感应电动势,其有效值为 $E = 4.44fN_1k_{w1}\Phi_m$, N_1k_{w1} 为每相整步绕组的有效匝数, Φ_m 为脉振磁场每极磁通的幅值。

当失调角 $\delta \neq 0$, 即 $\theta_1 \neq \theta_2$ 时,两机对应各相整步绕组的电动势不平衡。各回路电动势差为

$$\begin{aligned} \Delta E_a &= E_{2a} - E_{1a} = 2E \sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \sin \frac{\delta}{2} \\ \Delta E_b &= E_{2b} - E_{1b} = 2E \sin \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - 120^\circ \right) \sin \frac{\delta}{2} \\ \Delta E_c &= E_{2c} - E_{1c} = 2E \sin \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} + 120^\circ \right) \sin \frac{\delta}{2} \end{aligned} \quad (3-13)$$

整步绕组每相等效阻抗为 Z , 则定子各相绕组中的均衡电流为

$$\begin{aligned} I_a &= \Delta E_a / 2Z = E/Z \sin \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \sin \frac{\delta}{2} \\ I_b &= \Delta E_b / 2Z = E/Z \sin \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} - 120^\circ \right) \sin \frac{\delta}{2} \\ I_c &= \Delta E_c / 2Z = E/Z \sin \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} + 120^\circ \right) \sin \frac{\delta}{2} \end{aligned} \quad (3-14)$$

上式中均衡电流三相之和为零,所以自整角机三相星型接法无中线。

2. 磁势

同时自整角机各相整步绕组的电流和励磁绕组产生的磁动势作用产生整步转矩。但是由于励磁绕组为单相,均衡电流是三相,为分析整步转矩方便,将三相整步绕组的三相均衡电流等效为两相电流,两相的 d 轴与励磁轴线重合, q 与 d 相互垂直,并沿逆时针方向超前 90° ,如图 3-11 所示。

对于 ZLF,有

$$I_{1d} = I_a \cos \theta_1 + I_b \cos(\theta_1 - 120^\circ) + I_c \cos(\theta_1 + 120^\circ) = -\frac{3}{4} \frac{E}{Z} (1 - \cos \delta) \quad (3-15)$$

$$I_{1q} = I_a \sin \theta_1 + I_b \sin(\theta_1 - 120^\circ) + I_c \sin(\theta_1 + 120^\circ) = -\frac{3}{4} \frac{E}{Z} \sin \delta$$

对于 ZLJ, 由于三相整步绕组中的电流与 ZLF 大小相同, 方向相反, 因此其三相整步绕组中的电流在 d 轴与 q 轴上的分量为

$$I_{2d} = -I_a \cos \theta_2 - I_b \cos(\theta_2 - 120^\circ) - I_c \cos(\theta_2 + 120^\circ) = -\frac{3}{4} \frac{E}{Z} (1 - \cos \delta) \quad (3-16)$$

$$I_{2q} = -I_a \sin \theta_2 - I_b \sin(\theta_2 - 120^\circ) - I_c \sin(\theta_2 + 120^\circ) = \frac{3}{4} \frac{E}{Z} \sin \delta$$

由于磁动势正比于电流, 因此 ZLF 电流分量 I_{1d} 、 I_{1q} 产生的磁动势在 d 轴与 q 轴上的分量为 $\bar{F}_{1d}$ 、 $\bar{F}_{1q}$, ZLJ 电流分量 I_{2d} 、 I_{2q} 产生的磁势在 d 轴与 q 轴上的分量为 $\bar{F}_{2d}$ 、 $\bar{F}_{2q}$, 如图 3-12 所示。

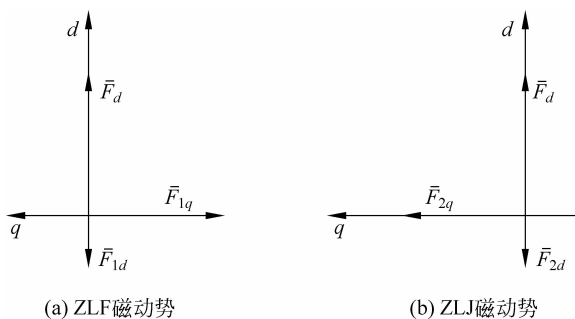


图 3-12 自整角机的 d 轴与 q 轴磁动势

由图 3-12 可见, 无论是 ZLF 还是 ZLJ, 在直轴方向上的磁势分量均为负值。表明整步绕组在直轴方向上的磁动势与励磁磁动势相反, 为去磁性质。在实际工作中, 失调角 θ 都是在较小的范围内, 则 I_{1d} 、 I_{2d} 以及相应的直轴磁势 $\bar{F}_{1d}$ 、 $\bar{F}_{2d}$ 较小; 而交轴方向上的磁势分量 $\bar{F}_{1q}$ 、 $\bar{F}_{2q}$ 对于 ZLF 和 ZLJ 来讲, 其大小相等, 方向相反。

3. 转矩

根据定子电流直轴和交轴分量的大小以及转子的励磁磁势 $\bar{F}_d$ 便可求出失调角为 δ 时力矩式自整角机整步转矩的大小。为了表述方便, 规定沿直轴(d 轴)和交轴(q 轴)正方向为磁动势和电流正方向, 并取逆时针方向为转子转角正方向, 直轴磁通 Φ_d 与正向交轴磁动势产生的转矩为负, 即顺时针转向的转矩为负, 如图 3-12 所示。当然电磁转矩的正方向为逆时针方向。

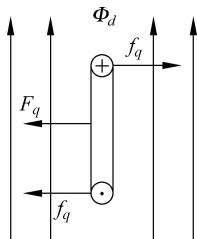


图 3-13 ZLJ 转矩的产生与定向

根据电机学的基本原理, 只有直轴磁通 Φ_d (或磁动势) 与交轴电流 I_q (或磁动势) 或交轴磁通和直轴电流 I_d 相互作用才能产生电磁转矩, 如图 3-13 所示, 磁动势中仅 q 轴分量产生电磁转矩, 其大小为

$$T_{em} = K \Phi_d I_q \quad (3-17)$$

式中, K 为与电机有关的转矩系数。由于所产生电磁转矩 T_{em} 力图使得失调角 δ 减小, 因此也称整步转矩。

将式(3-15)和式(3-16)中的 I_{1q} 和 I_{2q} 的值代入式(3-17),得到 ZLF 和 ZLJ 作用在定子上的整步转矩的值分别为

$$|T_{em1}| = K\Phi_d \left(\frac{3}{4} \frac{E}{Z} \sin\delta \right) = T_m \sin\delta \quad (3-18)$$

$$|T_{em2}| = K\Phi_d \left(\frac{3}{4} \frac{E}{Z} \sin\delta \right) = T_m \sin\delta = T_{em1}$$

根据整步转矩的定向规则,ZLF 直轴磁通 Φ_d 与负向交轴磁动势 $\bar{F}_{1q}$ 产的电磁转矩为正,ZLJ 直轴磁通 Φ_d 与正向交轴磁动势 $\bar{F}_{2q}$ 产的电磁转矩为负,考虑了整步转矩的方向后,得到 ZLF 和 ZLJ 作用在定子上的整步转矩分别为

$$T_{em1} = T_m \sin\delta \quad (3-19)$$

$$T_{em2} = -T_m \sin\delta \quad (3-20)$$

从式(3-19)和式(3-20)可知,ZLF 和 ZLJ 的整步转矩大小相等,方向相反。ZLF 整步绕组所产生的作用于定子的整步转矩为逆时针方向,而 ZLJ 整步绕组所产生的作用于定子的整步转矩为顺时针方向。考虑到整步绕组位于定子侧,所以作用到转子轴上的使转子转动的整步转矩方向分别与式(3-19)和式(3-20)相反。也就是说,当 ZLF 转子在外力作用下逆时针旋转一个角度 θ_1 后,ZLF 转子上所产生的整步转矩为顺时针方向,倾向于保持转子原来的位置;而 ZLJ 转子上所产生的整步转矩为逆时针方向,驱使转子逆时针转过角度 θ_2 ,从而使两转子转过的角度一致,即 $\theta_1 = \theta_2$, $\delta = 0$,最终整步转矩为零,系统进入新的稳定位置。

自整角机整步转矩特性曲线如图 3-14 所示。其中,当失调角 $\delta = 1^\circ$ 时的整步转矩称为比整步转矩(或比转矩)。比整步转矩 T_θ 反映了自整角机的整步能力和精度。

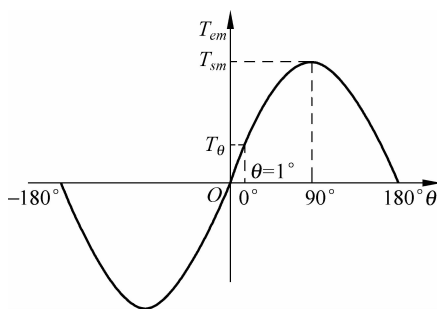


图 3-14 自整角机整步转矩特性

4. 力矩式自整角机的性能指标

力矩式自整角机的主要性能指标如下所述。

1) 零位电压

力矩式自整角发送机的精度是由零位误差来衡量的。力矩式接收机的精度,按在系统中跟随发送机的静态误差确定。发送机转子励磁后,从基准电气零位开始,转子每转过 60° ,在理论上定子绕组中应该有一相电动势为零,此位置称为理论电气零位;但由于设计、结构和工艺等因素的影响,实际电气零位与理论电气零位是有差异的,此值即为零位误差。

2) 比整步转矩

当失调角 $\delta = 1^\circ$ 时的整步转矩称为比整步转矩(或比转矩)。比整步转矩 T_θ 反映了自整角机的整步能力和精度。它表示接收机与发送机在协调位置附近,单位失调角所产生的转矩。显然,比整步转矩愈大,整步能力就愈大。为了减小接收机的静态误差,应尽可能提高其值。同时,还要尽可能减小轴承、电刷和滑环摩擦力矩及转子不平衡力矩等。

3) 阻尼时间

阻尼时间指接收机自失调位置稳定到协调位置所需的时间。阻尼时间愈短,系统稳定得愈快。为了减小阻尼时间,力矩式接收机的转子通常都装有阻尼绕组或机械阻尼器。

3.3.2 阻尼绕组

力矩式自整角接收机在指示状态下运行,其静态精度主要取决于比整步转矩和摩擦力矩的大小。利用交轴阻尼绕组可以有效地调整交轴短路参数的大小,使自整角机获得合理的参数配置,提高比整步转矩,所以力矩式自整角接收机中通常都装设交轴阻尼绕组。此外,交轴阻尼绕组还可以抑制转子振荡,起到电气阻尼的作用。

力矩式自整角机中的阻尼绕组可分为两大类,一类是凸极式转子的阻尼绕组,另一类是隐极式转子的阻尼绕组。第一类又可分为单阻尼回路(即单根阻尼条放置在磁极的中心线位置处)和双阻尼回路(即两根阻尼条放置在磁极中心线的两侧)两种。第二类也可分为两种,一种是在隐极式转子上装设两个在空间位置相互正交的绕组,其中一个绕组作为激磁绕组,另一绕组自行短接作为交轴阻尼绕组;另一种是在隐极式转子上装设三相对称绕组,其中一相绕组短接作为阻尼绕组,另外两相绕组并联作为励磁绕组。

力矩式自整角接收机中阻尼绕组的选型大致是这样考虑的:对于凸极式自整角机,在大尺寸时选取双阻尼回路,尺寸较小时选取单阻尼回路;频率较高而尺寸又较大的,则可采用隐极转子阻尼绕组。

3.3.3 力矩式自整角机的应用

力矩式自整角机广泛用作位置指示器。图 3-15 表示容器内液面位置指示器工作原理图。浮子 1 随着液面升降而上下移动,通过绳索、滑轮和平衡锤带动自整角发送机 3 的转子转动,将液面位置转换成发送机转子的转角。自整角发送机和接收机 4 之间再通过导线可以远距离连接,它们的转子是同步旋转的,于是自整角接收机转子就带动指针准确地跟随着发送机转子的转角变化而偏转。若将角位移换算成线位移,就可方便地测出水面的高度,从而实现远距离的位置指示。这种位置指示器不仅可以测量水面或液面的位置,也可以用来测量阀门的位置、电梯和矿井提升机的位置、变压器分接开关位置等。

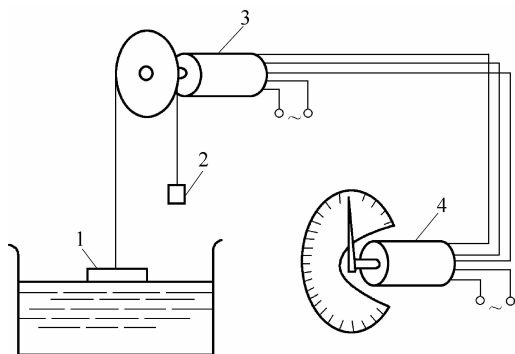


图 3-15 容器内液面位置指示器

1—浮子; 2—平衡锤; 3—发送机; 4—接收机

3.4 自整角机的选择与使用

力矩式和控制式自整角机特点不同,选用时应根据电源情况、负载种类、精度要求、成本等方面综合考虑。

3.4.1 自整角机的特点

作为控制系统的元件,自整角机除要求重量轻、体积小、精度高、寿命长外,根据自整角机在系统中应用的特点,还有下列要求。

力矩式自整角机的技术要求:

- (1) 有较高的静态和动态转角传递精度;
- (2) 有较高的比力矩和最大同步力矩;
- (3) 要求阻尼时间短,即当接收机与发送机失调时,接收机能迅速回到与发送机协调的位置;
- (4) 在运行过程中无抖动、缓慢爬行、黏滞等现象;
- (5) 能在一定的转速下运行而不失步;
- (6) 要求从电源取用较小的功率和电流。

控制式自整角机的技术要求:

- (1) 电气误差尽可能小;
- (2) 零位电压的基波值及总值尽可能小;
- (3) 控制式变压器应有较高的比电动势和较低的输出阻值,以满足放大装置对灵敏度的要求;
- (4) 控制式变压器应有较高的输入阻抗,控制式发送机应有较低的输出阻抗,控制式差动发送机的阻抗应与发送机和变压器的阻抗相匹配;
- (5) 速度误差要小。

一般,若系统对精度要求不高,且负载又很轻时,选用力矩式自整角机。其特点是系统简单,不需要伺服电动机、放大器等辅助元件,成本低。若系统对精度要求较高,且负载较大,则选用控制式自整角机组成伺服系统。其特点是传输精度高,负载能力取决于系统中伺服电动机和放大器的功率,但系统复杂,需要辅助元件,成本高。

3.4.2 自整机的选用

选用自整角机应注意其技术数据必须与系统的要求相符合,主要应比较励磁电压、最大输出电压、空载电流和空载功率、开路输入阻抗、短路输出阻抗、开路输出阻抗等技术参数是否符合要求。在选用自整角机应注意以下事项。

(1) 自整角机的励磁电压和频率必须与使用的电源符合。当电源可以任意选择时,对尺寸小的自整角机,选电压低的电源比较可靠;对长传输线,选用电压高的电源可以降低线路压降的影响;要求体积小、性能好的,应选用 400Hz 电源的自整角机;否则采用工频电源比较方便(不需要专门的中频电源)。

(2) 相互连接使用的自整角机,其对接绕组的额定电压和频率必须相同。

(3) 在电源容量允许的情况下,应选用输入阻抗较低的发送机,以便获得较大的负载能力。

(4) 选用自整角变压器和差动发送机时,应选输入阻抗较高的产品,以减轻发送机的负载。

3.4.3 使用注意事项

1. 零位调整

当自整角机在随动系统中用作测量差角时,在调整之前,其发送机和接收机刻度盘上的读数是不一致的,因此需要进行零位调整。调零的方法是转动发送机的转子使其刻度盘上的读数为零,然后固定发送机转子,再转动接收机定子,使接收机在协调位置时,刻度盘的读数也为零,并固定接收机定子。

2. 发送机和接收机切勿调错

前文为了简化理论分析,曾假设发送机与接收机结构相同,实际上发送机和接收机结构上是有差异的,而且两者的参数也不尽相同,因此二者不能互换。尤其是力矩式接收机本身装有阻尼装置,发送机则没有阻尼,这样如果二者接错,必然使自整角机产生振荡现象,影响正常运行。

3.5 自整角机测控系统应用举例

本节以一个基于自整角机的雷达方位角测量系统为例来说明自整角机测控系统及其应用。

方位角测量是大型雷达设备、各种导航系统以及一些控制系统感知自身状态的重要途径,因此方位角测量系统的研究颇为重要。雷达测定目标的位置采用球坐标系,以雷达所在地作为坐标原点,目标的位置由斜距、方位角和俯仰角 3 个坐标确定。其中,雷达在测定目标的方向时,必须将雷达的方位、俯仰转轴的角位置转换成计算机或其他装置可以利用的转角数据准确输出。

目前,在各种伺服控制系统中,作为角位置传感器的元件主要有自整角机、增量式编码器和绝对式编码器等。自整角机是一种感应式自同步微电机,与增量式编码器相比,其优点在于具有绝对位置检测的能力,并且能在较恶劣的环境条件下工作。绝对式编码器虽然也能提供绝对的位置信号,但其信号的精度受码道数目的限制;而且绝对式编码器对于工作环境有较高的要求。因此自整角机在方位角测量系统中得到广泛的使用。这里重点介绍雷达方位角位置检测系统组成、自整角机的测角原理以及利用单片机 MSP430F149 将自整角机产生的轴角信号转换成二进制数字信号,进而输入到显示系统中。

3.5.1 雷达方位角测量系统组成

雷达方位角测量系统由方位轴、自整角机、单片机 MSP430F149 组成的轴角/数字转换电路等部分组成。将自整角机安装在雷达方位轴的方位铰链上,雷达转盘转动时带动方位轴的方位铰链的活动,转角信号通过方位铰链的心轴传递到自整角机,自整角机将转角信号转换成三相交流调制信号,经隔离转换电路隔离并转换成两相正、余弦信号,输入到由单片机 MSP430F149 组成的轴角/数字转换电路,转换后的数字量通过单片机解算出方位角,最

后可将在雷达终端显示或转发,其系统组成如图 3-16 所示。

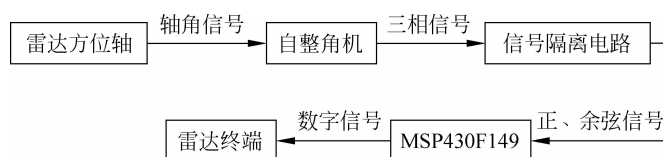


图 3-16 雷达方位角测量系统组成

3.5.2 自整角机的测角与控制

自整角机是系统的测角元件,如图 3-17 所示。

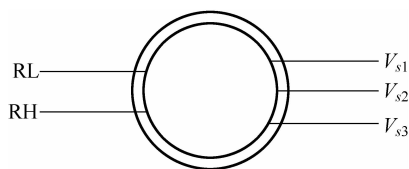


图 3-17 自整角机的示意图

假设在自整角机的转子一侧加励磁电压 $V_R = V_m \sin \omega t$,则在定子一侧将感应出相同频率的信号为

$$\begin{aligned} V_{s1} &= V_m \sin \omega t \times \sin \theta \\ V_{s2} &= V_m \sin \omega t \times \sin(\theta - 120^\circ) \\ V_{s3} &= V_m \sin \omega t \times \sin(\theta + 120^\circ) \end{aligned} \quad (3-21)$$

式中, θ 为转子相对于定子的转角(即所要测的方位角信号)。

这样,自整角机将雷达方位角轴角信号转换为三相交流调制信号 V_{s1} 、 V_{s2} 和 V_{s3} ,将三相交流调制信号与隔离转换电路(见图 3-18)的 S_1 、 S_2 和 S_3 相连,激励参考信号由 RL 和 RH 输入。因此,三相信号经电阻降压及变压器隔离后,通过由运算放大器 A_1 和 A_2 构成的电子斯科特(Scott)变压器电路转换成正弦信号和余弦信号,即

$$\begin{aligned} V_z &= KU_m \sin \omega t \times \sin \alpha \\ V_y &= KU_m \sin \omega t \times \cos \alpha \end{aligned} \quad (3-22)$$

式中, V_z 为正弦信号; V_y 为余弦信号; α 为自整角机轴角; U_m 为激励参考电压幅值; K 为变比。

同样,参考信号经电阻降压、变压器隔离及运算放大器倒相。由于运算放大器可能产生低失调电压和漂移,因此电路中所有电阻应选用精密电阻,以保证降低后的三相信号幅度比例基本不变,同时电子斯科特变压器要有足够的转换精度。

3.5.3 轴角/数字转换电路的硬件设计

单片机 MSP430F149 是 TI 公司设计的超低功耗的微控制器,可使用电池长期工作,电源电压范围 1.8~3.6V。MSP430F149 具有 2KB 的 RAM 和 16 位总线并带 FLASH,采用 16 位的总线,外设和内存统一编址,寻址范围可达 64K;有 48 位可灵活编程的 I/O 接口,这

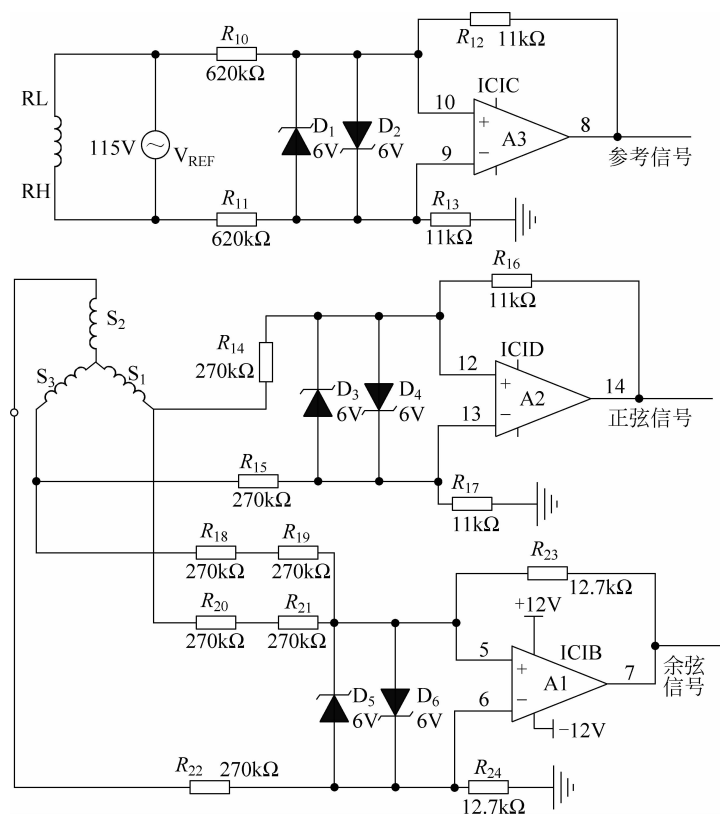


图 3-18 自整角机隔离转换电路

给系统的软硬件设计带来了极大的便利和灵活；外部不用扩展存储器和 I/O 口，外围设备得到了简化。

单片机 MSP430F149 是轴角/数字转换电路的中心处理单元，负责将自整角机隔离电路产生的正弦信号、余弦信号转换成二进制数字信号，转换控制电路如图 3-19 所示，单片机采用 3.3V 供电。

自整角机隔离转换电路完成的正弦和余弦信号以及参考信号，通过单片机的 P1.4、P1.5、P1.6 和 P1.7 口进行输入、存储，并经单片机 MSP430F149 的处理模块处理数据，将处理完的二进制数字量通过单片机的 P2.1、P2.2、P3.0、P3.1、P3.2、P3.3、P3.4 和 P3.5 输出，外部读写数据先读低 8 位，再读高 8 位，单片机再将处理完的数据通过 P3.6、P3.7、P2.3、P2.4、P1.0、P1.1、P1.2 和 P1.3 口送给雷达显示模块。这样，雷达转动的方位角就可以实时地在雷达终端显示，为操作者了解航向提供了有力的数据。

3.5.4 软件设计

系统运行过程中，软件程序不断发送指令信号，采集到自整角机/数字转换器发送的数字信号后，经过一定的运算规则转换成对应角度，输入到显示设备并同时供给其他子程序调用实时测量的角度值。具体角位置测量步骤如下：

- (1) 程序发送读指令信号给转换器，经一定延时后，转换器的数字输出端出现有效数值；

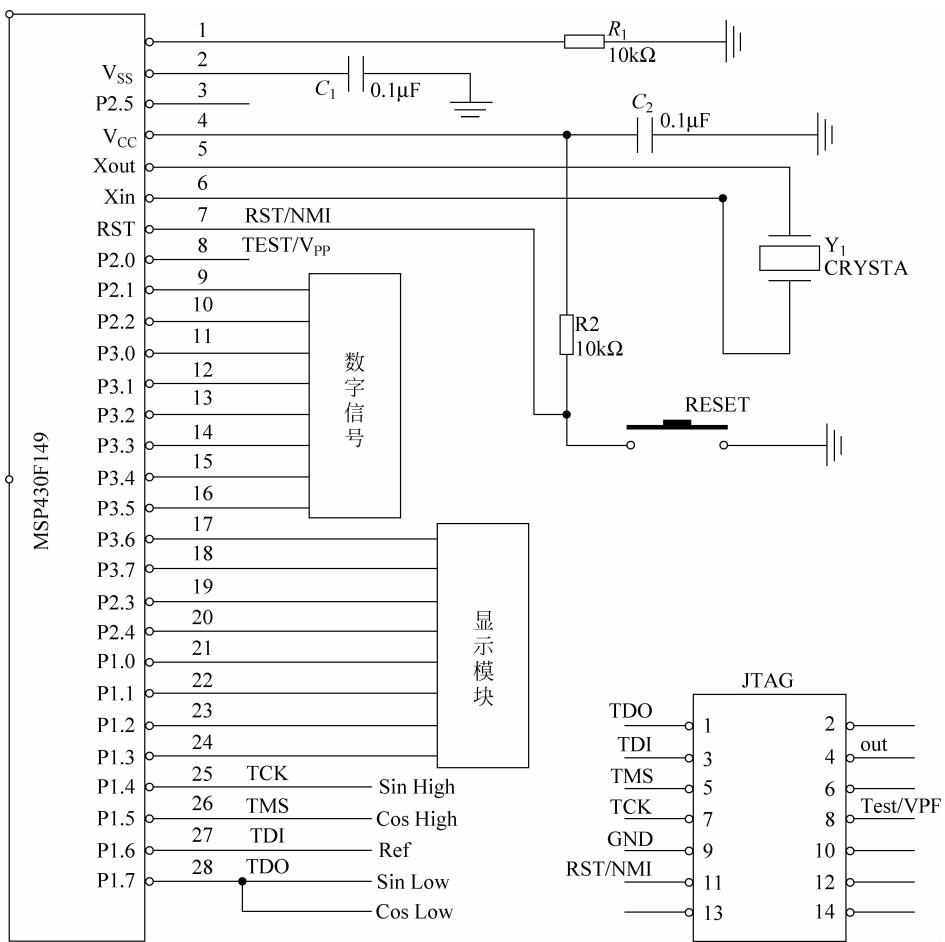


图 3-19 单片机控制转换电路图

- (2) 程序读取该数据并进行处理,得到对应的测量角度值;
- (3) 取消读指令信号,同时显示角度值,该值可供其他子程序调用。

软件设计采用 C 语言编程,角度测量采用模块化设计,可很好地嵌入综合检测系统软件中,软件流程图如图 3-20 所示。

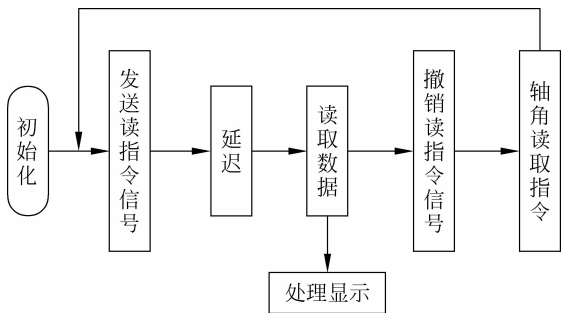


图 3-20 软件设计流程

本章小结

本章首先介绍自整角机的结构和分类,对各个部分进行了简要介绍,随后详细介绍了控制式自整角机和力矩式自整角机的工作原理。

自整角机是同步传递系统的关键元件之一,通常是成对或多只同时使用。其运行方式有两种:一种是力矩式,另一种是控制式。力矩式自整角机自己能输出整步转矩,不需要放大器和伺服机构,在整步转矩的作用下,接收机转子便追随发送机轴同步旋转。控制式自整角机的输入量是自整角发送机轴的转角,输出量是自整角变压器的输出电压,并通过放大器、伺服机构带动接收轴追随发送轴同步旋转。

控制式自整角机的精度比力矩式的高,可以驱动随动系统中较大的负载。使用力矩式自整角机时的相关设备较简单,用于小负载、精度要求不太高的场合,常常用来带动指针或刻度盘作为测位器。

思考题与习题

1. 自整角机可以把发送机和接收机之间的转角差转换成与角差成正弦关系的_____信号。
2. 控制式自整角机的比电压大,就是失调同样的角度所获得的信号电压大,系统的灵敏度就_____。
3. 无力矩放大作用,接收误差稍大,负载能力较差的自整角机是_____式自整角机。
A. 力矩 B. 控制 C. 差动 D. 单机
4. 自整角变压器的整步绕组中合成磁势的性质和特点分别是什么?
5. 力矩式自整角发送机和接收机的整步绕组中合成磁势的性质和特点分别是什么?
6. 简述自整角机的结构和分类。
7. 何谓比整步转矩?有何特点?