

图3.2.30 流向方位传感器电路图

电路 流向方位传感器的测量电路如图3.2.30所示。图中  $W_2$  为测量电位器。 $W_3$  用来调节流向方位传感器的零点频率。调节方法是：当测量电位器  $W_2$  在  $0^\circ$  方位时，调节  $W_3$  使电压频率变换器 8DL8103 的输入电压为  $1V$ ，再调节  $W_4$  使电压频率变换器的输出电压为  $1\text{ kHz}$  频率。

$W_5$  用来调满度 ( $360^\circ$ ) 频率。调节方法是：当测量电位器达满度  $360^\circ$  方位角时，这时电压频率变换器的输入电压为  $8V$ ，调  $W_5$  使输出频率为  $8\text{ kHz}$ 。

5G14 构成集成稳压电源，它供给测量电位器  $8V$  电压。

主要性能 流向方位传感器的主要性能为：

1. 测量电位器工作电压： $8V$ ；
2. 方位角范围： $0 \sim 360^\circ$  (即  $1 \sim 8\text{ kHz}$ ,  $19\text{ 赫兹/度}$ )；
3. 精度： $1\%$ 。

流向方位传感器具有结构简单、性能稳定等优点。它可用于江河、海水流向连续测量和遥测。

### § 3.3 电感法

#### § 3.3.1 旋转变压器式

工作原理 旋转变压器实际上是一种具有次级旋转绕组的变压器。当转子转动时，定子激磁绕组与转子输出绕组之间的耦合发生变化，使输出电压信号随之按正弦、余弦或线性函数关系变化。

旋转变压器的工作原理和普通变压器相似。普通变压器的输入、输出绕组是相对固定的，其输出电压与输入电压之比为常数。而旋转变压器的激磁绕组和输出绕组是分别嵌在定子和转子上的，故输出的电压大小随转子位置而变。如图3.3.1所示，当  $D_3D_4$  绕组开路，在激磁绕组  $D_1D_2$  上加交流激磁电压  $\dot{U}_{s1}$  时，激磁绕组中就有电流  $\dot{I}_{s1}$ ，并在气隙中建立一个与转子位置无关的交变磁通  $\phi$ 。如果  $\phi$  在气隙中按正弦规律分布，则输出绕组  $Z_1Z_2$  和  $Z_3Z_4$  上感应电压的大小就是转角  $\theta$  的余弦和正弦函数，即

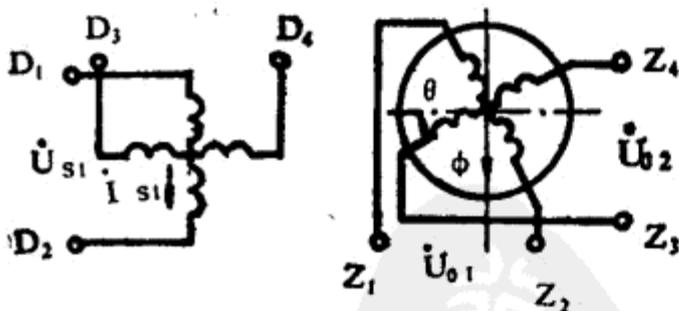
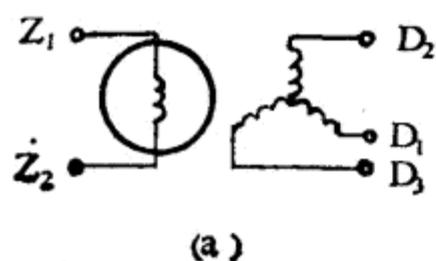


图 3.3.1 正余弦旋转变压器原理图

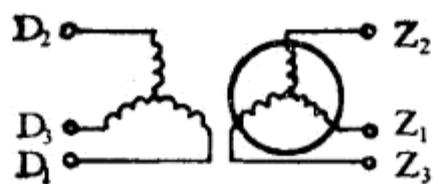
$D_1D_2$ · 激磁绕组  $D_3D_4$ · 交轴绕组  
 $Z_1Z_2$ · 余弦输出绕组  $Z_3Z_4$ · 正弦输出绕组

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{O1} &= k_u U_{s1} \cos\theta \\ \dot{U}_{O2} &= k_u U_{s1} \sin\theta \end{aligned} \right\} \quad (3.3-1)$$

当输出绕组接有负载时，就有电流流过输出绕组并产生电枢反应磁通，使气隙中的磁场发生畸变。这时输出电压将产生偏差，不与转角成严格的正、余弦函数关系。为了减小这种原理误差，旋转变压器工作时要将  $D_3D_4$  交轴绕组短接，或给  $Z_1Z_2$ 、 $Z_3Z_4$  两输出绕组接以对称负载。为了提高旋转变压器的工作精度，其负载阻抗应尽量大。



(a)



(b)

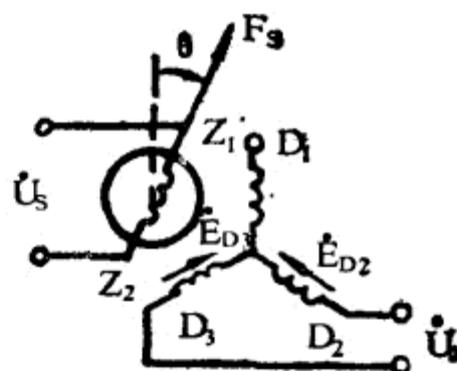


图 3.3.11 力矩式自整角机电气原理图  
(a)发送机、接收机 (b)差动发送机、接收机

图 3.3.12 自整角机用作角度传感器

$$\dot{E}_{D_2} = E_m \cos(\theta - 120^\circ)$$

$$\dot{E}_{D_3} = E_m \cos(\theta + 120^\circ)$$

因此输出电压为

$$\dot{U}_0 = \dot{E}_{D_2} - \dot{E}_{D_3} = \sqrt{3} E_m \sin\theta = K \sin\theta \quad (3.3-7)$$

式中  $K = \sqrt{3} E_m = 4.44 \sqrt{3} f N_d \phi_{1m}$ ;  $N_d$  为定子一相绕组匝数;  $\phi_{1m}$  为转子激磁磁通的瞬时极大值;  $f$  为激磁电流频率。

由式(3.3-7)可见,输出电压  $U_0$  与  $\theta$  角的正弦函数成正比。当角度不大时,  $U_0$  与  $\theta$  角近似成线性关系。例如在  $\pm 30^\circ$  内,非线性误差为 4% 左右。

**结构** 自整角机的结构与一般小型线绕式异步电动机相似。定子为隐极式。铁心上嵌有三相星形连接分布绕组,各相绕组的轴线在空间互成  $120^\circ$ 。转子结构按不同类型采用凸极式或隐极式、单相或三相绕组(参见表 2.3.4)。定子和转子均采用导磁性能优良的铁镍软磁合金或硅钢片叠成。力矩式接收机的转子上还嵌有阻尼绕组以改善阻尼性能。为了提高自整角机变压器的精度,转子采用隐极式和单相、两极分布绕组。转子绕组通过滑环和电刷间的接触与外电路接通的自整角机,称作接触式自整角机。接触式自整角机的结构图,如图 3.3.13 所示。

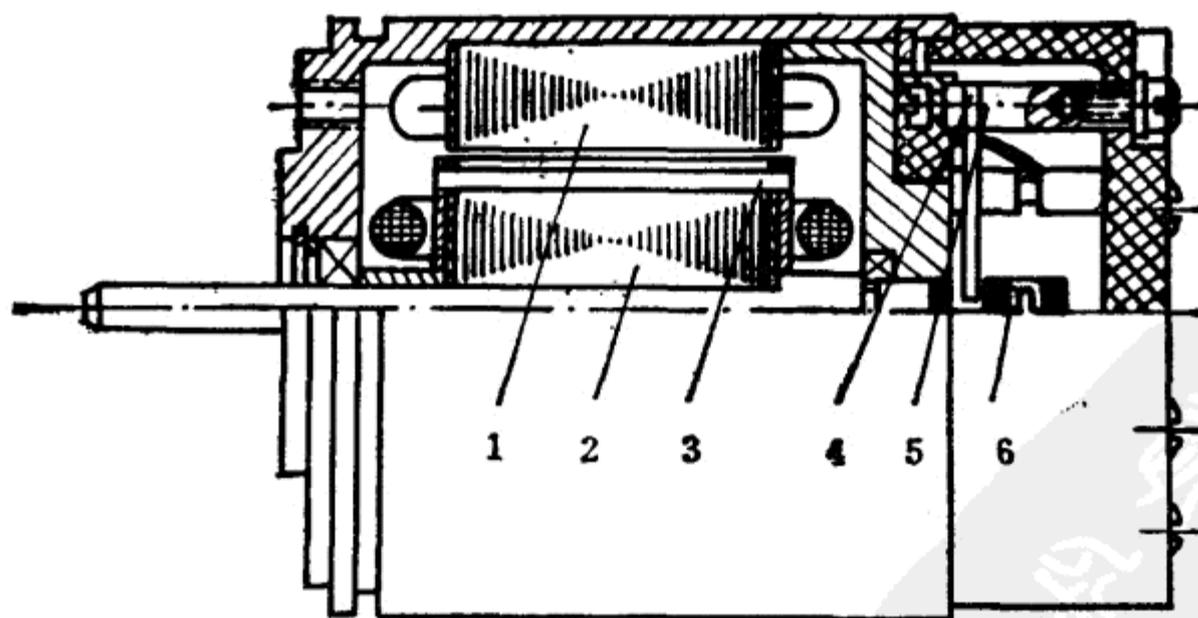


图 3.3.13 接触式自整角机结构图

1. 定子 2. 转子 3. 阻尼绕组 4. 电刷 5. 接线柱 6. 滑环

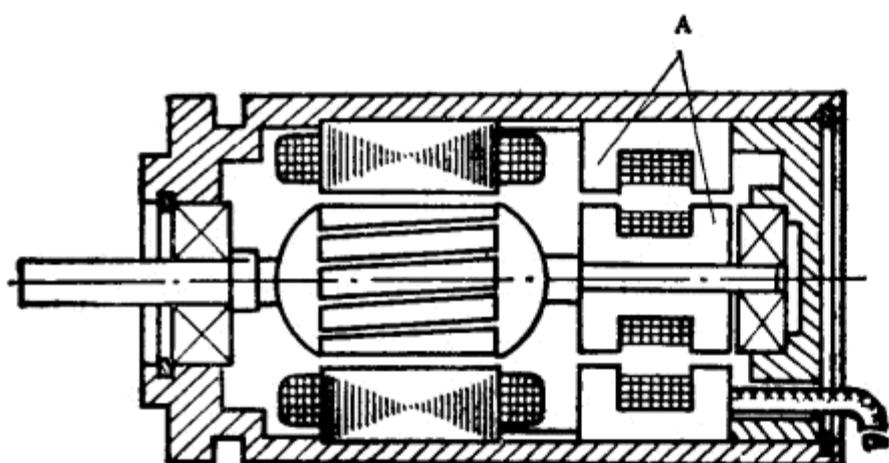


图 3.3.14 带环形变压器的无接触式自整角机

与滑环间的滑动接触，故有可靠性高、寿命长、不产生无线电干扰等优点。其缺点是结构复杂、电气性能指标较差。

某些力矩式自整角接收机和差动接收机在转轴上装有可与转轴相对转动的钢制惯性阻尼圆盘（即机械阻尼器）以提高阻尼性能。

上述自整角机均使用单相交流电源供电，故又称单相自整角机。常用的电源为：频率为400Hz，电压为26、36、115V；频率为50Hz，电压为110V。

我国自整角机的机座系列为20、28、36、45、55、70、90，对应的机壳外径为20、28、36、45、55、70、90mm。

接触式单相自整角机结构比较简单、性能较好、使用比较广泛。

**主要性能** 自整角机的主要性能和影响性能的主要因素见表3.3.9和表3.3.10。

由于自整角机可以把一个机械轴的转角传输给机械上没有联系的一个或数个轴，无接触摩擦，传输精度高，因此在水库的水位指示、闸门控制、雷达天线的同步旋转、陀螺及惯导系统，以及各种自动控制系统中获得广泛应用。有时还单独用作活动范围不大的角度传感器，如陀螺地平仪和平台的倾斜随动系统中的角度传感器等。

控制式自整角机与力矩式自整角机的比较见表3.3.11。

各种型号自整角机的主要性能见表3.3.12~表3.3.18。

目前国外标准型自整角机的生产已处于稳定成熟阶段。产品使用环境温度为 $-55\sim+125^{\circ}\text{C}$ ；静态误差为 $0.5^{\circ}$ 、 $0.75^{\circ}$ 、 $1^{\circ}$ ；剩余电压为 $0.65\sim 1.05\text{V}$ （当电源电压为 $115\text{V}$ 时）；寿命在 $1150\text{转/分}$ 时为2000小时。自六十年代以来，国外已先后试制成功无刷自整角机、高温自整角机、高精度自整角机、霍尔效应自整角机、以自整角机为主体的组合电机等新产品，其中有些产品已开始系列化生产。

两种常见的无接触式自整角机的结构如图3.3.14和图3.3.15所示。在图3.3.14中，使用环形变压器A代替接触式结构中的电刷和滑环，通过电磁耦合使转子绕组获得外电路励磁。其余各部分与接触式结构相同。图3.3.15为带轴向磁路的无接触式自整角机结构示意图，其磁路走向如图中虚线所示。

无接触式自整角机由于没有电刷

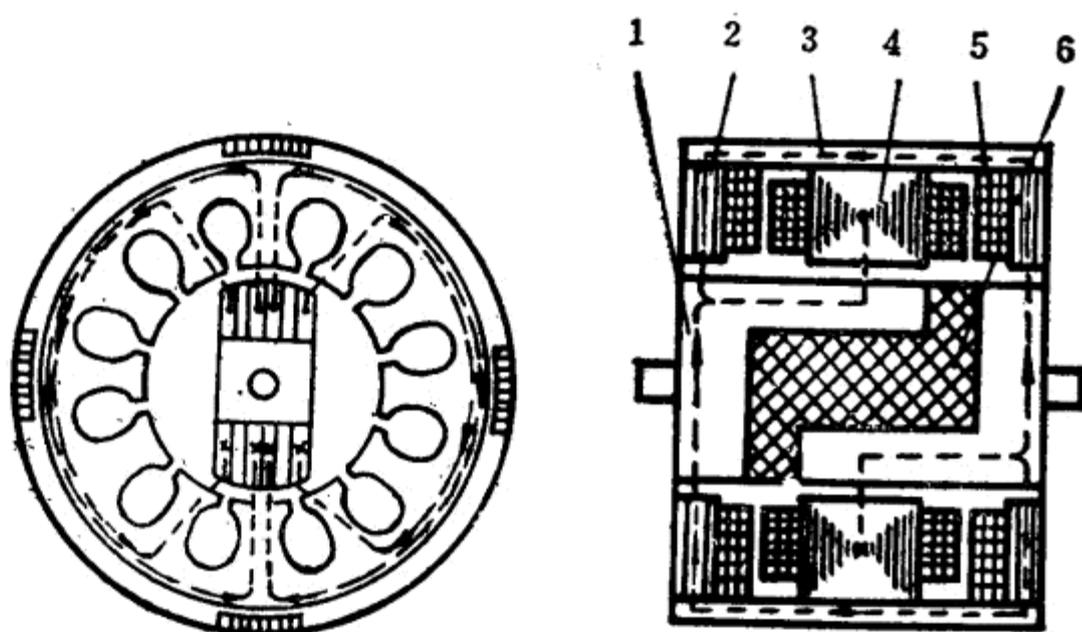


图 3.3.15 带轴向磁路的无接触式自整角机示意图

1. 转子 2. 导磁环 3. 磁轭 4. 定子铁心 5. 激磁绕组  
6. 非导磁体



表 3.3.11 控制式自整角机与力矩式自整角机比较

项 目	控 制 式 自 整 角 机	力 矩 式 自 整 角 机
适 用 范 围	精度较高或负载较大的伺服系统	精度较低的指示系统
负 载 能 力	自整角变压器只输出信号, 负载能力取决于系统中的伺服电动机及放大器的功率	接收机的负载能力受比整步转矩的限制, 只能带动指针、刻度盘等轻负载
精 度	较 高	较 低
系 统 结 构	较复杂, 需用伺服电动机、放大器、减速齿轮箱等	较简单, 不需其它辅助元件
系 统 造 价	较 高	较 低

表 3.3.12 KL 系列控制式自整角机的主要性能

型 号	额定电压 (伏)	频 率 (赫)	付方电压 (伏)	空载电流 (安)	摩擦力矩 (克·厘米)	剩余电压 (毫伏)	重 量 (公斤)
12KF4G	20	400	9	0.7	4	50	25
12KCF4G	9		9	0.1		50	
12KB4G	9		18	0.05		70	
20KF4E	36		16	0.072		70	
20KCF4E	16		16	0.148		70	
20KCB4E	16		32	0.081		80	
28KF4B	115		90	0.042	6	150	150
28KCF4B	90		90	0.039		150	
28KB4B	90		58	0.02		100	
28KF4E	36		16	0.135		70	
28KCF4E	16		16	0.252		70	
28KB4E	16		32	0.126		80	
28KB4E <sub>1</sub>	16	32	0.059	80	200		
36KF4B	115	90	0.092	8	150	200	
36KCF4B	90	90	0.078		150		
36KB4B	90	58	0.039		100		
45KF4B	115	90	0.2		150	400	
45KCF4B	90	90	0.156		150		
45KB4B	90	58	0.078		100		
45KF5C	110	50	90	0.038	180		
45KCF5C	90		90	0.035	180		
45KB5C	90		58	0.028	150		

表 3.3.13

KL系列力矩式自整角机的主要性能

型 号	额 定 电 压 (伏)	频 率 (赫)	付 方 电 压 (伏)	空 载 电 流 (安)	空 载 功 率 (瓦)	比 力 矩 (克·厘米/度)	摩 擦 力 矩 (克·厘米)	阻 尼 时 间 (秒)	重 量 (克)	
28LF4B	115	400	90	0.1	2	0.6	6	—	150	
28LCF4B	90			—	—	—	—	—	—	
28LJ4B	115			0.1	2	0.6	—	3	150	
28LF4E	36			0.3	2	0.6	6	—	150	
28LCF4E	16		16	—	—	—	—	—	—	
28LJ4E	36			0.3	2	0.6	—	3	150	
36LF4B	115		90	—	0.3	4	2.5	8	—	200
36LCF4B	90				0.3	4	1.5	8	—	
36LJ4B	115				0.3	4	2.5	—	3	
45LF4B	115			50	90	0.6	8	8	8	—
45LCF4B	90	0.6				8	4	8	—	
45LJ4B	115	0.6				8	8	—	3	
45LF5C	110	0.15	3			3	8	—		
45LCF5C	90	—	—			—	—	—		
45LJ5C	110	0.15	3	3	—	3				

表 3.3.14

ND、NS系列自整角机的主要性能

型 号	额 定 电 压 (伏)	额 定 频 率 (赫)	励 磁 电 流 不 大 于 (安)	消 耗 功 率 不 大 于 (瓦)	次 级 电 压 (伏)	最 大 整 步 力 矩 (克·厘米)	比 力 矩 不 小 于 (克·厘米/度)	摩 擦 力 矩 不 大 于 (克·厘米)		阻 尼 时 间 不 大 于 (秒)	重 量 (公斤)		
								无 励 磁	有 励 磁				
ND-404	110	50	0.28	8	50±2	—	—	20	25	—	0.8		
ND-404P		400 (500)	1.3 (0.9)	18(15)	100±4			20	25		0.8		
ND-414		50	0.5	12	55±2			35	30		1.18		
ND-414B		50	0.5	12	150±6			—	—		—	1.18	
ND-501		50(60)	0.7	13	57±2			50	70		2.8		
ND-501B		—	0.7	13	150±6			—	—		2.8		
ND-511		—	1	15	57±2			55	80		3.7		
ND-521		50	1.3	22	57±2			60	90		5		
NS-404		50(60)	0.28	8	50±2			550	10		11	14	0.8
NS-501			0.75	15	55±2			2600	50		30	30	3

表 3.3.15 DI、SS 系列自整角机的主要性能

型 号	额定电压 (伏)	频率 (赫)	励磁电流不大于 (安)	消耗功率不大于 (瓦)	次级电压 (伏)	最大整步力矩不大于 (克·厘米)	比力矩不小于 (克·厘米/度)	摩擦力矩不大于 (克·厘米)		阻尼时间 (秒)	重量 (公斤)	
								有励磁	无励磁			
DI-150	110	500	0.30	4.4	47	—	—	14	14	—	0.28	
DI-404		50	0.42	13	50			7.5	10		0.8	
DI-414		50	0.65	20	57			30	30		1.2	
DI-454	220	500	0.315	11	58	—	—	10	10	—	0.8	
DI-501		50	0.7	15	57			50	50		3.4	
DI-511		50	1.0	18	57			50	50		3.8	
SS-132	110	330	0.16	3	—	49	0.5	4	3.5	6	0.2	
SS-150		500	0.19	2.8	47	130	1.1	4	4		0.19	
SS-404		50	0.42	13	50	220	4	7.5	9		3	0.8
SS-404M	120	50	0.42	13	50	220	4	7.5	9	3	0.8	
SS-405		50	0.13	7.5	53	—	—	30	12		—	0.8
SS-407		330	0.5	9	—	—	—	—	—		—	—
SS-454	220	500	0.315	11	58	160	3	8	7.5	6	0.8	

表 3.3.16 NED 系列自整角机的主要性能

型 号	额定电压 (伏)	额定频率 (赫)	最大整步力矩 (克·厘米)	比力矩不小于 (克·厘米/度)	摩擦力矩不大于 (克·厘米)		阻尼时间不大于 (秒)	重量 (公斤)
					有励磁	无励磁		
NED-101	50	50	300	6	7.5	9	4	0.8
NED-101B	150		250	4	7.5	9		0.8
NED-501	57		2550	35	22	22		2.8
NED-501B	150	1250	17	22	22	2.6		
NED-101P	100	400(500)	650(500)	10(8)	12	12	3	0.85

表 3.3.17 ZFM、ZBM、ZSM 型自整角机的主要性能

型 号	励磁电压 (伏)	额定频率 (赫)	励磁电流 (安)	消耗功率 (瓦)	次级电压 (伏)	次级电压偏差不大于 (伏)	比整步力矩 (克·厘米/度)	重量 (公斤)
ZFM-11K	230	1000	0.35	0.65	150	1.5	—	0.57
ZBM-11K	150				45	0.5		
ZCM-11K	150				150	1.5		
ZFM-11L	230	1000	0.60	10	150	1.5	—	0.57
ZSM-11L	230							8

表 3.3.18 BD、BS 型自整角机的主要性能

型 号	励磁电压(伏)	额定频率(赫)	励磁电流不大于(安)	消耗功率不大于(瓦)	次级电压(伏)	最大整步力矩(克·厘米)	比整步力矩(克·厘米/度)	阻尼时间不大于(秒)	摩擦力矩不大于(克·厘米)		重量(公斤)						
									有励磁	无励磁							
1) BD-404A	110	50	0.4	$\frac{11}{12.5}^*$	49	—	—	—	15	12	1.25						
BD-404B		50	0.4	$\frac{11}{12.5}^*$	150												
BD-404P		$\frac{400}{500}$	$\frac{0.9}{0.7}$	$\frac{23}{19}$	100												
BS-404A		50	0.4	$\frac{11}{12.5}^*$	49	240	4.5	2	10	7.5	1.30						
BS-404B		50	0.4	$\frac{11}{12.5}^*$	150	210	4.0	3		7.5	1.30						
BS-404P		$\frac{400}{500}$	$\frac{0.9}{0.7}$	$\frac{23}{19}$	100	$\frac{450}{300}$	$\frac{6.5}{4.0}$	3		12	1.25						
BS-405		50	0.9	2	35	—	—	—	15	12	1.25						
2) BD-500		127	50	0.5	20	55	—	—	—	20	10	2.20					
2) BS-500													800	12	3	18	10
2) DBS-500	800												12	3	18	16	4.20
BD-501A	110	50	1.2	$\frac{25}{27}^*$	55	—	—	—	35	20	3.85						
BD-501B					150	—	—	—	35	20	3.85						
BS-501A					55	1800	32	2	30	15	4.10						
BS-501B	150	1800	32	3	30	15	4.10										

注：\* 分子部分—自整角机在冷态时所消耗功率，分母部分—自整角机在热态时所消耗功率；1)—BD-404A和BS-404A可制成励磁电压为220伏品种；2)—BD-500、BS-500、DBS-500可制成励磁电压为110伏及220伏品种。

我国目前的自整角机系列产品已有120余种，未成系列的50余种。产品使用环境条件从 $-25\sim+45^{\circ}\text{C}$ 到 $-55\sim+85^{\circ}\text{C}$ 共分六个等级；静态误差为 $0.5^{\circ}$ 、 $1.2^{\circ}$ 、 $2^{\circ}$ ；剩余电压为 $1.3\sim 1.57\text{V}$ (当电源电压为115V时)；寿命在360转/分时为500小时。各生产厂除不断提高自整角机的精度、降低剩余电压、提高接触可靠性、延长使用寿命外，正在大力研制各种新产品。

### § 3.3.3 电感移相器

**工作原理** 电感移相器是正余弦旋转变压器的一种特殊应用。它能把输入电压改变一个相位角再输出，改变的相位角等于移相器转子的机械转角，而输出电压的幅值并不随转子的转角而变化。

正余弦旋转变压器接上移相元件R、C即构成电感移相器。如图3.3.16所示。

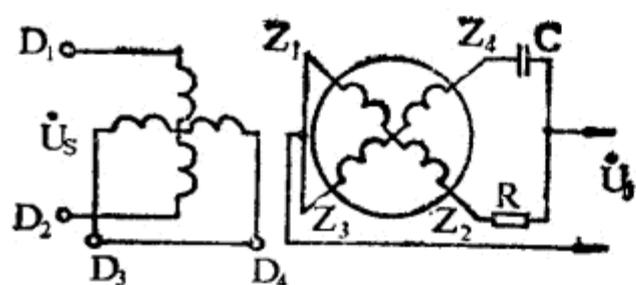


图 3.3.16 电感移相器电气原理图

空载时，移相元件的参数应满足下式：

$$R = \frac{1}{2\pi fC} \quad (\Omega) \quad (3.3-8)$$

有载时，应满足下式：

$$\left. \begin{aligned} R + R_{2K} &= \frac{1}{2\pi fC} + (-X_{2K}) \\ R_{2K} &= |-X_{2K}| \end{aligned} \right\} (\Omega) \quad (3.3-9)$$

此时，  $\dot{U}_0 = \frac{KU_S}{\sqrt{2}} e^{i(\theta - 45^\circ)}$  (V)

式中  $K$ —变压器的变比；

$R_{2K}$ —输出阻抗电阻分量( $\Omega$ )；

$X_{2K}$ —输出阻抗电抗分量( $\Omega$ )。

设计时，需满足  $R_{2K} = |-X_{2K}|$ 。

事实上，保证  $R_{2K}$  与  $X_{2K}$  完全相等是困难的，所以设计时一般使  $X_{2K} > R_{2K}$ 。这时，为了保证移相器的正确工作，可以在电容回路中增加补偿电阻  $R_C$ ，见图 3.3.17，并使  $R_C =$

$$X_{2K} - R_{2K}$$

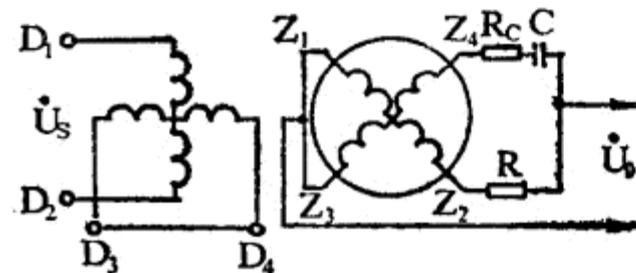


图 3.3.17 电感移相器加补偿电阻  $R_c$  的原理图

**主要性能** 电感移相器的测角精度可以达到很高，例如几个角分以内。借助它不仅可以用来改变某一电压的相位(移相)，而且可以通过示波器采用比较法代替相位计来检测两个同频率电信号的相位差。由于电感移相器直接将机械转角与电压的相移联系在一起，因而它特别适用于轴角数字编码，通过测量其输出电压  $U_0$  相对于输入电压  $U_s$  的相位差，便可通过电子线路和计数器直接读出机械轴的转角。电感移相器作为移相元件常用于测角、测距和随动系统中。它在测角装置中的应用见图 3.3.18；在同步随动系统中的应用见图 3.3.19。

电子线路和计数器直接读出机械轴的转角。电感移相器作为移相元件常用于测角、测距和随动系统中。它在测角装置中的应用见图 3.3.18；在同步随动系统中的应用见图 3.3.19。

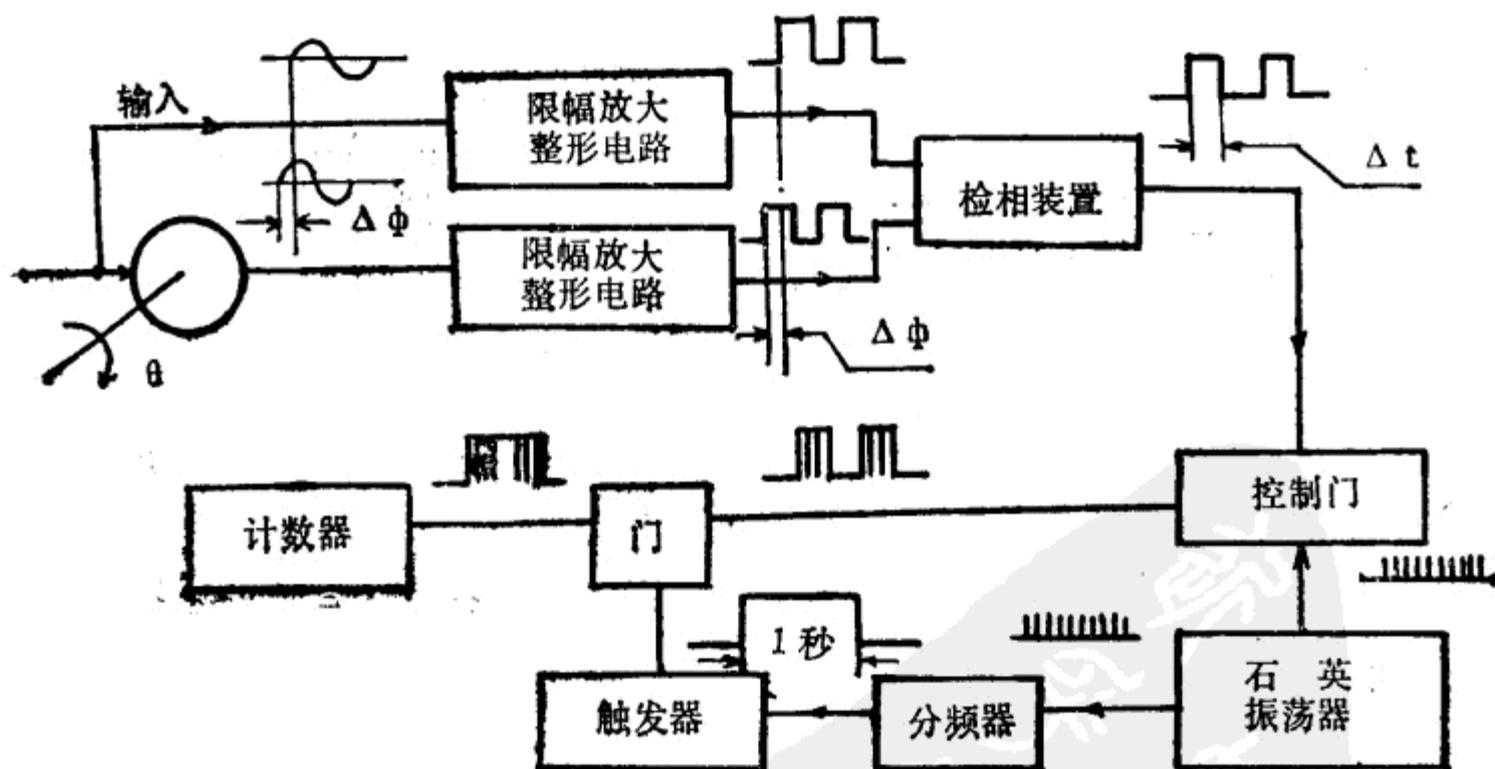


图 3.3.18 电感移相器作为角度—相位转换器

由于电感移相器的应用日益增多，不少国家已将它构成一个独立的微电机系列。我国的电感移相器已构成系列。

§ 3.3.4 微动同步器式

**工作原理** 当需要测量小角度机械转角时(如±10°)，往往采用微动同步器式角度传感器(简称微动同步器)。

微动同步器的特点是体积小、结构可靠、分辨力高、无接触力矩、线性度好。

微动同步器的结构形式很多，图 3.3.20 ((a)、(b))是常见的两种形式。下面主要介绍图 3.3.20(b)形结构，它是四极微动同步器。

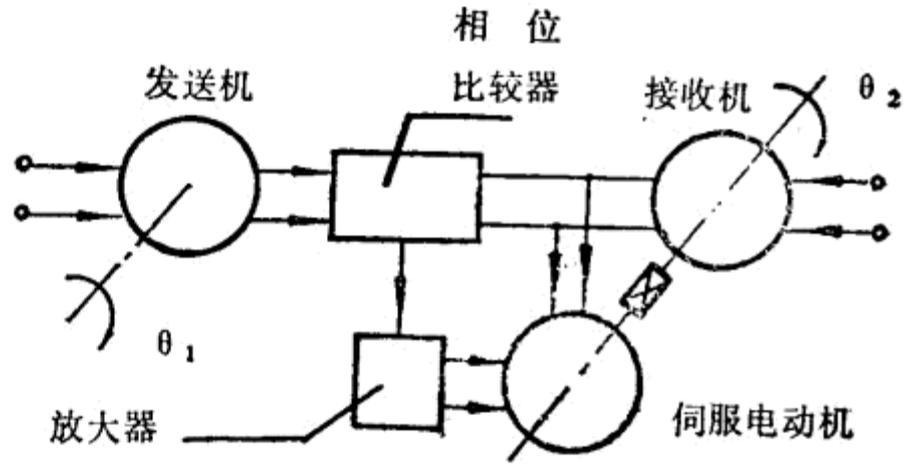


图 3.3.19 由一对电感移相器组成的同步随动系统

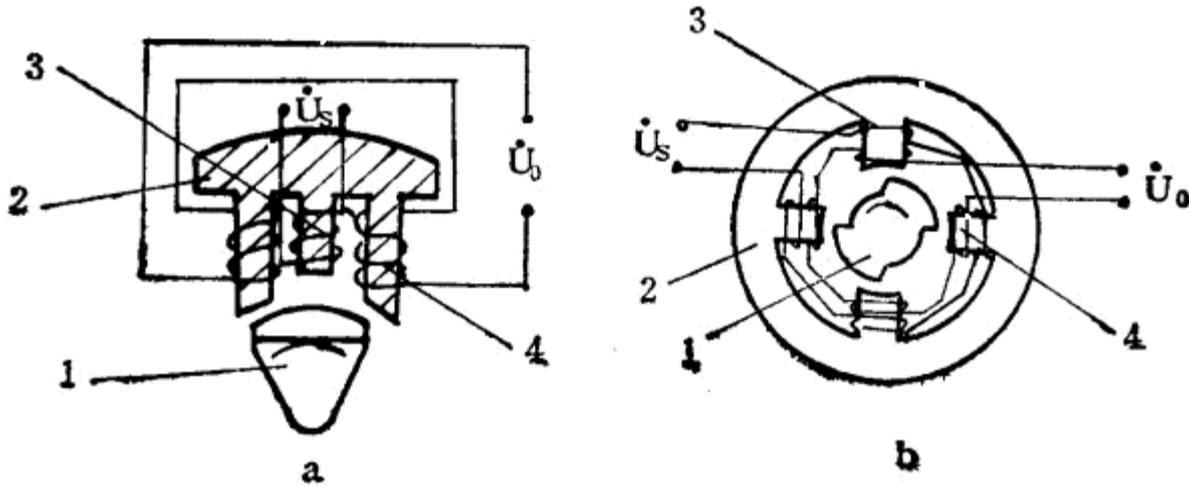


图 3.3.20 常见微动同步器结构图

a. E型结构 b. 四极结构

1. 转子 2. 定子 3. 初级绕组 4. 次级绕组  $\dot{U}_s$ : 激磁电压  $\dot{U}_o$ : 输出电压

微动同步器的工作原理如图 3.3.21 所示。图中设四只定子极上的初级线圈分别为  $N_{11}$ 、 $N_{12}$ 、 $N_{13}$ 、 $N_{14}$ ，次级线圈分别为  $N_{21}$ 、 $N_{22}$ 、 $N_{23}$ 、 $N_{24}$ 。四只初级线圈串联成初级绕组。当供以交流激磁电压时，在各极上产生的磁通为  $\phi_1$ 、 $\phi_2$ 、 $\phi_3$ 、 $\phi_4$ 。在 1、3 和 2、4 两相对磁极中磁通的方向一致，如图中箭头所示。由于铁芯中存在脉动磁场，在副边次级绕组中就产生感应电势。次级绕组接法应保证  $e_{21}$  和  $e_{23}$  的方向相同， $e_{22}$  和  $e_{24}$  的方向相同。

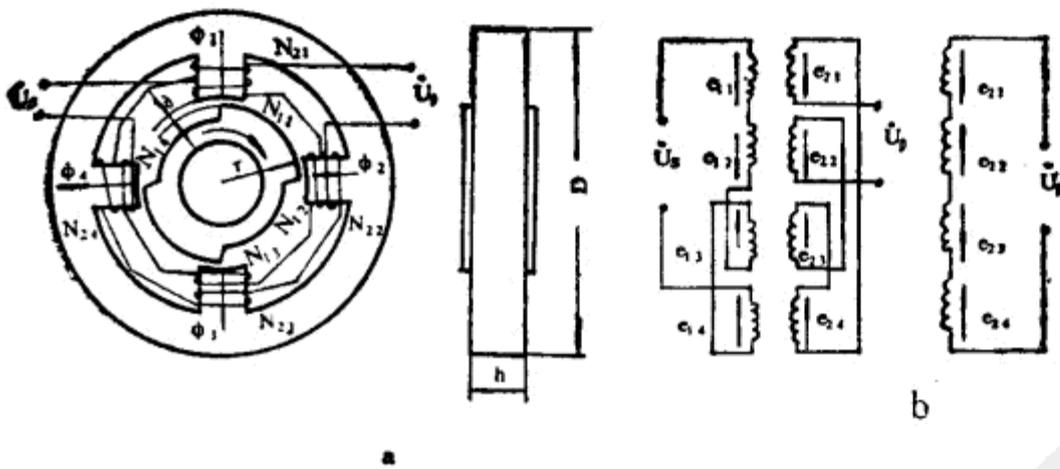


图 3.3.21 微动同步器工作原理及接线图

(a) 工作原理图 (b) 接线图

证  $e_{21}$  和  $e_{23}$  的方向相同， $e_{22}$  和  $e_{24}$  的方向相同。

为了满足上述要求,应按图 3.3.21(b) 中的接线方法连接初级线圈和次级线圈。这样输出电压  $\dot{U}_0$  是各次级线圈感应电势的代数和,即

$$\dot{U}_0 = (e_{22} + e_{24}) - (e_{21} + e_{23}) \quad (3.3-10)$$

在初始位置  $\alpha = 0$  时,转子的每一个极都遮住了定子极的一半。这时四个定子极的磁路对称,初级绕组的磁势产生的磁通彼此相等( $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = \phi_4$ )。次极绕组产生的感应电势也相等。由式(3.3-10)可见,输出电压  $\dot{U}_0$  为零。

当转子顺时针转过正  $\alpha$  角时,转子的两极遮住了定子,使得定子四个极的面积不相等,即定子极“2”、“4”被遮住的面积增加,定子极“1”、“3”被遮的面积减小。这样四只定子极上的磁通将重新分布。“2”、“4”极的磁通增加,“1”、“3”极的磁通减少。因此  $\phi_1 = \phi_3 < \phi_2 = \phi_4$ 。四只极上的次级绕组的感应电势相应改变,  $e_{21} = e_{23} < e_{22} = e_{24}$ 。当  $\alpha$  角继续增加时,  $e_{21}$ 、 $e_{23}$  继续减小,  $e_{22}$ 、 $e_{24}$  继续增加。当转子的两极与定子的两极(“2”、“4”)对齐时,  $e_{22}$ 、 $e_{24}$  最大,  $e_{21}$ 、 $e_{23}$  最小(为零)。  $\alpha$  角继续转动时  $e_{22}$ 、 $e_{24}$  开始减小,  $e_{21}$ 、 $e_{23}$  开始增加。因此转子在定子中的全周运动中输出的将是一个周期函数。而实际上使用的是线性部分,所以偏转角一般很小。在这一部分  $e_{22}$  或  $e_{24}$  的相位与输出电压相位相同,输出电压与转角  $\alpha$  成正比。

当转子反时针方向偏转负  $\alpha$  角时,输出电压情况与上述情况相同,仅相位相差  $180^\circ$ 。

下面我们讨论微动同步器的输出特性方程。

根据差动变压器的基本关系式,可以求出各次极线圈的感应电势的有效值  $e_{22}$ 、 $e_{21}$  分别为

$$\begin{aligned} e_{22} &= e_{24} = 2\pi f N_{22} \phi_{2m} \\ e_{21} &= e_{23} = 2\pi f N_{21} \phi_{1m} \end{aligned} \quad (3.3-11)$$

式中  $f$ —电源频率(Hz);

$N_{21}$ 、 $N_{22}$ 、 $N_{23}$ 、 $N_{24}$ —四只次级线圈匝数,

令其都等于  $N_2$ ;

$\phi_{2m}$ 、 $\phi_{1m}$ —定子第二极和第一级的磁通随时间变化的幅值(Wb)。

将式(3.3-11)代入式(3.3-10)并根据有关磁路计算可得输出电压  $U_0$  为

$$\dot{U}_0 = K\alpha \quad (3.3-12)$$

式中  $K$ —微动同步器的放大倍数(V/rad),其表达式为

$$K = \frac{8\pi f N_1 N_2 i \mu_0 r h}{\delta} \quad (3.3-13)$$

式中  $N_1$ —初级线圈匝数;

$N_2$ —次级线圈匝数;

$i$ —初级线圈电流(A);

$\mu_0$ —空气导磁率  $0.4\pi \times 10^{-8}$  (H/cm);

$r$ —转子半径(cm);

$h$ —定子和转子铁芯的有效厚度(cm)

$\delta$ —定子与转子之间气隙长度(cm)

从式(3.3-12)可以看出,当放大系数  $K$  是常数时,输出电压  $\dot{U}_0$  与转角  $\alpha$  成正比。从式(3.3-13)看出,很多因素影响  $K$  值,如  $f$ 、 $i$ 、 $\mu_0$ 、 $\delta$  的变化均会引起  $K$  值变化,即产生线性误差。

**结 构** 旋转变压器的结构与自整角机十分相似。如图3.3.2所示。定子和转子铁心也采用导磁性能优良的铁镍软磁合金或硅钢片叠成。在定子内圆和转子外圆表面的斜槽中,均嵌有两个在空间相隔90°的分布绕组。为了保证磁感应强度沿气隙圆周成正弦规律分布,通常采用同心正弦绕组。旋转变压器的转子都设计成隐极式。

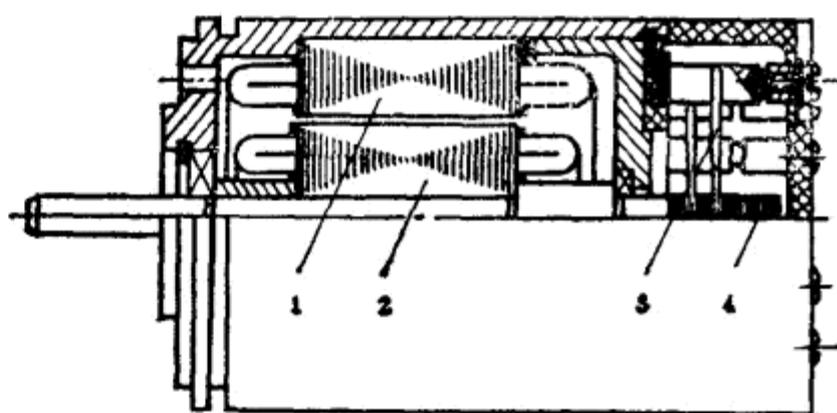


图 3.3.2 正余弦旋转变压器结构图

1. 定子 2. 转子 3. 电刷 4. 滑环

旋转变压器按结构可分为有限转角和

无限转角两种。前者的转子回转角受到一定的限制,通常只能转1~2周,其输出绕组采用弹簧软连接,不存在电刷滑环的滑动接触,运行可靠。无限转角旋转变压器输出绕组通过电刷滑环引出,可靠性较差。

按输出电压与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、线性旋转变压器和比例式旋转变压器,见表3.3.1。后两种旋转变压器实际上也是正余弦旋转变压器。不同的是,线性旋转变压器采用了特定的变比和接线方式;比例式旋转变压器在结构上增加了一个将转子位置固定的装置。

表 3.3.1

旋转变压器分类

名 称	代 号	基 本 关 系 式	用 途
正余弦旋转变压器	XZ	$\dot{U}_{o1} = k_u U_{s1} \cos^2 \theta$ $\dot{U}_{o2} = -k_u U_{s1} \sin \theta$	座标变换、三角运算、角度数据传输、移相器、角度-数字转换
		$\dot{U}_{o1} = k_u U_{s1} \cos \theta + k_u U_{s2} \sin \theta$ $\dot{U}_{o2} = k_u U_{s2} \cos \theta - k_u U_{s1} \sin \theta$	
线性旋转变压器	XX	$\dot{U}_{o1} = k_u U_{s1} \frac{\sin \theta}{1 + k_u \cos \theta}$	机械转角与电信号的线性变换
比例式旋转变压器	XL	$\dot{U}_{o1} = k_u U_{s2} \cos \theta$	调节电压和匹配阻抗

各类旋转变压器的电气原理图见图 3.3.3。

旋转变压器的基座号系列为: 12、20、28、36、45、55; 相应机壳外径为: 12.5、20、28、36、45、55mm。

**主要性能** 旋转变压器的主要性能见表3.3.2。

正一余弦旋转变压器主要性能见表3.3.3~表3.3.6。

由于旋转变压器根据其设计和接法的不同,可以完成多种不同的功能,加上它精度较高,工作可靠,目前已大量使用在飞机方位和距离的自动解算系统、远距离同步传输系统和雷达、指挥仪等方面,在民用工业的自动控制系统中也获得大量应用。在这些系统中用它进行解算、数据的远距传输,以及作为移相器、坐标变换器等。

微动同步器的输出特性曲线如图 3.3.22 所示。其零位电压  $\dot{U}_0$  是我们不希望的。在电路部分我们将讲到消除它的方法。

微动同步器式角度传感器的实用方框图如图 3.3.23 所示。微动同步器的信号经放大后，执行电机输出转角（一般要经过减速）一方面带动电刷输出电压信号供遥测使用，另一方面反馈至微动同步器的定子，使之与转子“同步”。

**结 构** 微动同步器结构如图 3.3.24 所示。

它由转子、定子、绕组、弹性扭杆和壳体等组成。转子和定子之间的间隙要小而均匀。

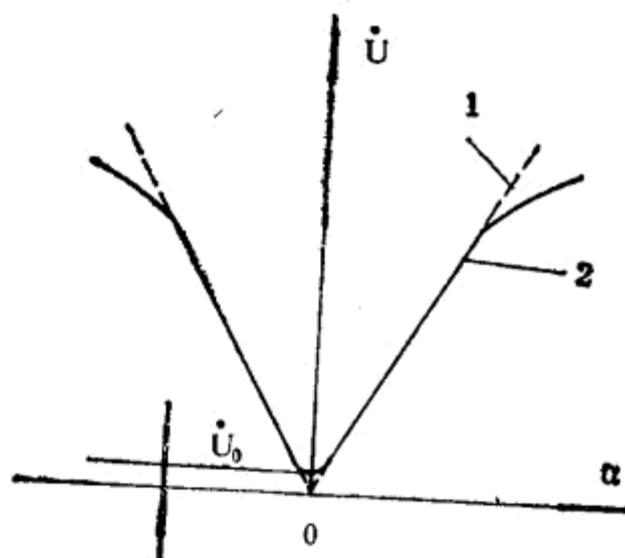


图 3.3.22 微动同步器的输出特性曲线  
 $\dot{U}_0$  零位电压 1.理想曲线 2.实际曲线

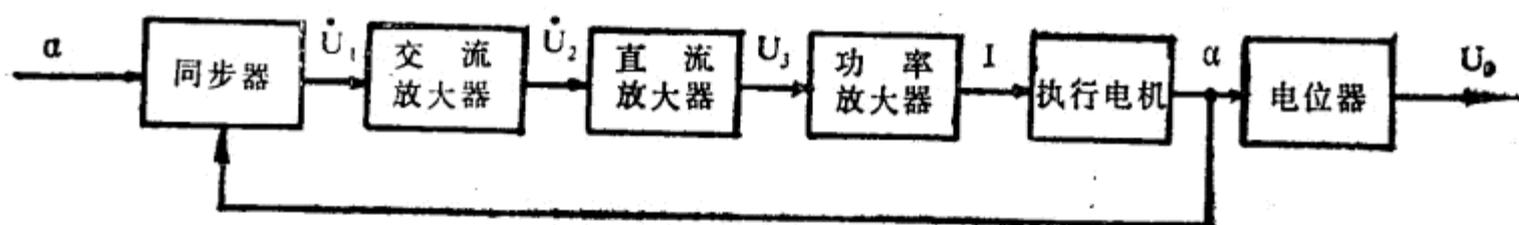


图 3.3.23 微动同步器实用方框图

### 1. 定子和转子

它们由高导磁性材料制成，如铍膜合金。转子一般是两极结构形式。定子极数可以是 4、8、16 极，而随着极数的增加，输出电压增加。但随着极数的增加，要保证几何尺寸的对称就困难，绕组的嵌线也困难，所以经常使用的是四极和八极。定子片和转子要经过整形和均质处理，以减小铁损耗。

### 2. 绕组

定子绕组分初级和次级两种。为了保证电气参数严格对称，要求线圈层数及每层的匝数要一致，最好是将电感电阻一致的选配使用。

### 3. 扭杆

它的一端与转子固定，另一端与壳体固定。当转子相对定子（壳体）有一转角时，扭杆产生扭力矩，起到定位弹簧的作用。合理设计扭杆尺寸，可以达到所需测量的角度范围。扭力矩与各参数的关系式为

$$M_K = \frac{\pi G R^4}{2L} \alpha_{max}$$

(3.3-14)

式中  $M_K$ —扭力矩(g·cm)；

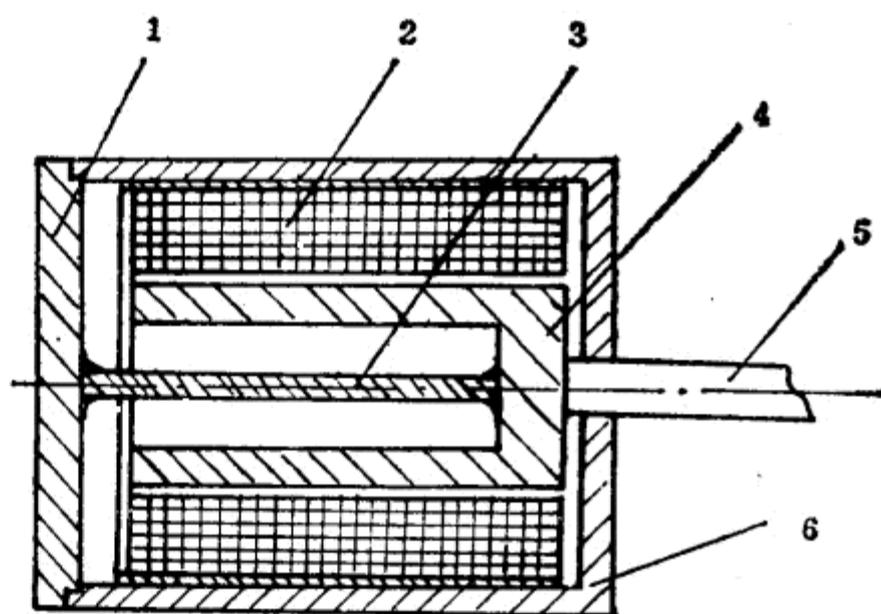


图 3.3.24 微动同步器结构原理图

1.盖 2.定子和绕组 3.扭杆 4.转子 5.转轴 6.壳体

$G$ —剪切弹性模数( $\text{g}/\text{cm}^2$ );

$R$ —扭杆的半径( $\text{cm}$ );

$L$ —扭杆的长度( $\text{cm}$ );

$\alpha_{\max}$ —扭转最大角度( $\text{rad}$ )。

扭杆一般采用弹性材料,如镀青铜线材制成。

**电 路** 下面主要介绍用电路对微动同步器的一些主要参数进行补偿的方法。这些主要参数有:

### 1. 零位电压的补偿

由图 3.3.22 特性曲线可以看出,输出特性有明显的零位电压  $\dot{U}_0$ 。它说明当转角  $\alpha=0$  时,两对次级线圈感应电势的大小(或方向)不相等,因此会有零位输出,其数值从几个毫伏到几十毫伏不等。由于零位电压使传感器的特性曲线不通过坐标原点,因而使传感器在零点附近不灵敏。当它输入到下级放大器时,又会使放大器过早的饱和,会堵塞有用信号的通过。从图 3.3.23 看出,放大的零位电压还会使执行电机产生误动作。这是不允许的。

要消除零位电压就要使定子和转子的几何尺寸和电气参数严格对称。对转子和定子的叠片要经过严格的热处理,提高导磁材料磁性的均匀性和稳定性。

通常情况下要采用线路补偿的方法,如图 3.3.25 所示。图 3.3.25(a)表示在输出端接电位器  $R_0$ ,以减少  $\dot{U}_0$  变化。当移动中心轴头位置时,可使两个次级线圈的输出电压大小和相位发生变化,从而达到减小  $\dot{U}_0$  目的。这种方法对零位电压中的基波正交分量有明显补偿效果。图 3.3.25(b)表示再并联一个电容  $C$ ,以补偿高次谐波分量。图 3.3.25(c)也是利用电位器进行补偿,和图 3.3.25(a)相比,只是增加了一个电阻  $R_1$ ,补偿原理一样。此法也常用。

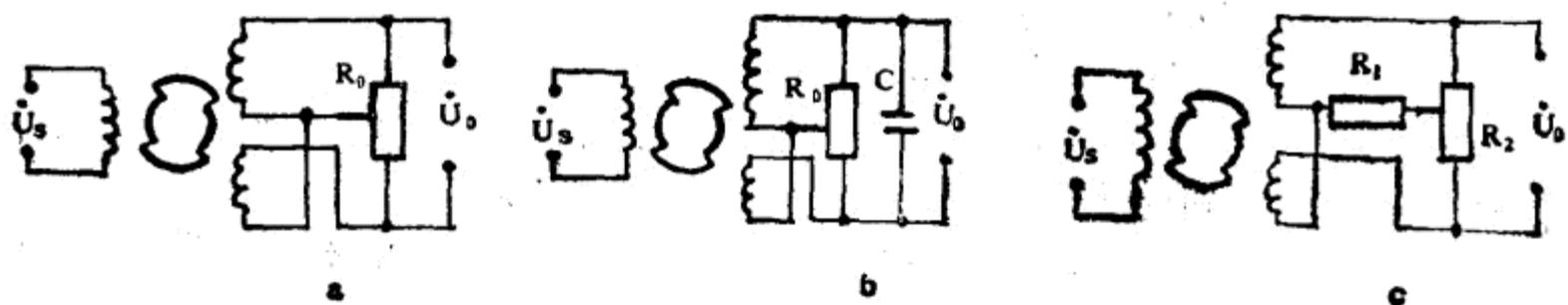


图 3.3.25 零位补偿电路

### 2. 减小温度影响的方法

当环境温度变化时会影响微动同步器的放大系数、线性度和相位。尤其是在低频工作情况下,这时初级线圈主要是电阻性的。当环境温度变化时,初级线圈电阻就随温度变化。若输入电压不变,则电流就要变化,并将引起磁通变化,最终引起输出电压变化。此外温度变化还会引起铁损耗的变化。

减小温度影响的方法,一是稳定激磁电流。这可以采用稳压电源和在初级回路中串接一只高阻值的降压电阻  $R_j$ ,达到使激磁电流不变,如图 3.3.26(a)所示。另一方法是采用热敏电阻  $R_T$  进行补偿。根据热敏电阻的温度升高其阻值下降的特性,保持初级线圈电阻不变,以达到激磁电流不变的目的。如图 3.3.26(b)所示。

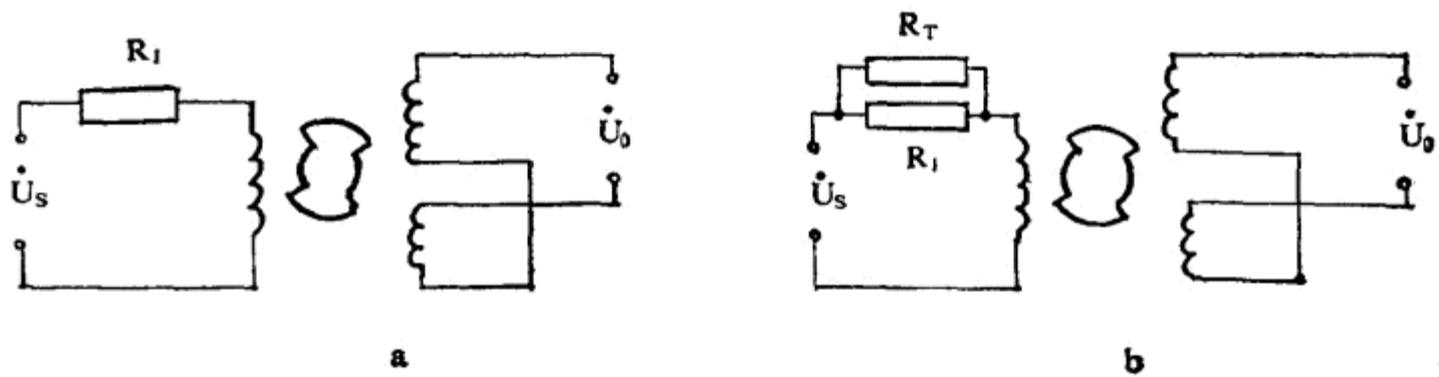


图 3.3.26 温度补偿电路

3. 输出电压与电源电压的相移补偿

采用交流输入、输出，就有个相位问题。初级线圈的铜耗是产生相移的主要原因，因此在设计时应提高品质因数(Q值)。另外在电路的输出端接上电阻  $R_H$  也可以达到补偿的目的。如图 3.3.27 所示。

主要性能 激动同步器式  
角度传感器目前能达到的主要性能如下：

1. 测量范围： $\pm 10^\circ$ ；
2. 灵敏限： $2''$  (分辨力)；
3. 灵敏度： $35\text{mV/rad}$ ；
4. 零位电压：小于  $3\text{mV}$ ；
5. 线性误差： $\leq \pm 3\%$ ；
6. 工作温度： $-40 \sim +50^\circ\text{C}$ ；
7. 使用电源：交流  $9\text{V}$ ，频率  $1200\text{Hz}$ 。

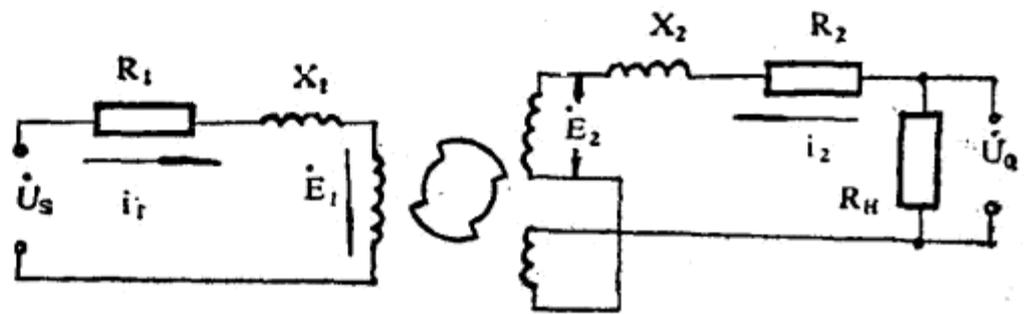


图 3.3.27 相移补偿电路

激动同步器的结构小巧、分辨力高，是一种无接触式角度输出装置，工作寿命长。但它测量角度范围比较小，输出信号是交流，一般要经过整流和放大，因此线路比较复杂。近年来直流微动同步器开始应用。它是将直流电压输入通过振荡器变为交流激磁电压，输入到初级线圈。次级线圈的感应电势通过全波整流变为直流输出。这样可以完全补偿因交流电压输出的波形失真和相位不一致等所造成的零位误差。其线路如图 3.3.28 所示。

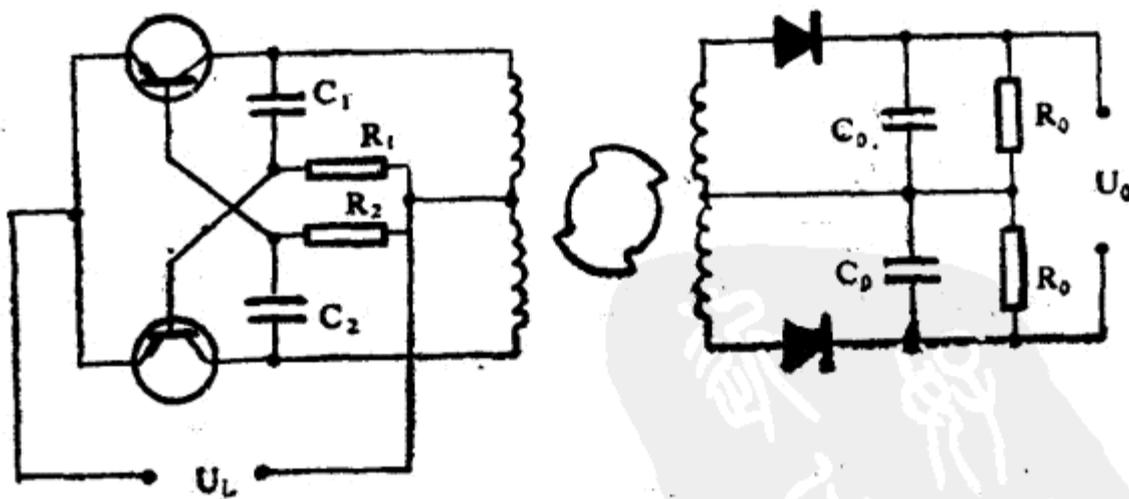


图 3.3.28 直流微动同步器线路图

§3.3.5 多极角度传感电机简介

随着自动化技术的发展，对角度检测和解算元件的精度要求也越来越高。对整个系统来讲，仅用单个元件，靠提高一般的旋转变压器或自整角机精度的办法已受到了限制，不能满足系统的要求。于是出现了多通道（或称多速）系统和元件。如在图 3.3.29(a)中，基本回路和  $n$  速回路的速比是  $1:n$ 。基本回路用来粗测， $n$  速回路用来精测。粗、精两回路靠开关网络自动切换。粗、精两个发送机和两个接收机相当于一对一般自整角机的作用。由于精密齿轮的误差有  $3 \sim 5$  角分，所以用  $1:n$  齿轮耦合的双通道系统也达不到很高的精度。图 3.3.29(b)是在图 3.3.29(a)的基础上产生的电气增速双通道系统。基本回路元件是一对极的， $n$  速回路元件是  $n$  对极的。它们的机械转速虽相同，但每转的输出电压周期数是  $1:n$ 。其作用与图 3.3.29(a)相同，它避免了齿轮误差。这种双通道元件就是由粗机（一对极）和精机（多对极）构成的多极角度传感电机，如多极自整角机、多极正余弦旋转变压器和多极电感移相器。这种系统的精度可以达到  $20$  角秒，甚至  $3 \sim 7$  角秒。

多极角度传感电机的工作原理与相应的一对极产品相同。用于伺服系统的多极角度传感电机一般是  $30、40、50、60、72$  极；用于解算装置的多极角度传感电机一般是  $16、32、64、128$  极。

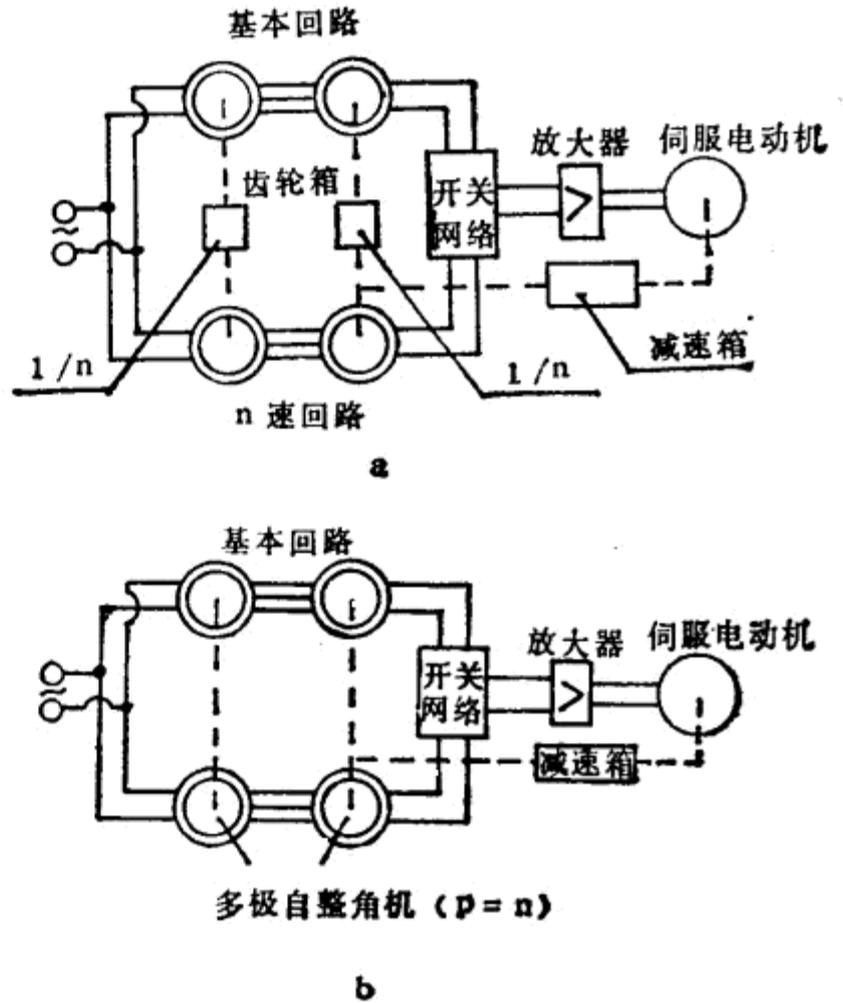


图 3.3.29 双通道伺服系统原理图

§ 3.4 电容法

**工作原理** 测量角度和角位移也可采用变面积式电容传感器。当角度的变化引起电容器工作面积变化时，电容量发生相应的变化，用测量电路测出电容量的变化，就实现了角度和角位移的测量。

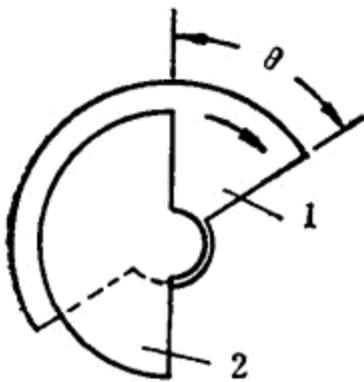


图 3.4.1 电容式角位移传感器  
1. 动极板 2. 定极板

电容式角位移传感器的原理如图 3.4.1 所示，当动极板产生角位移  $\theta$  时，就改变了电容器的工作面积，其电容量也发生相应改变。

$$\left. \begin{aligned} \text{当 } \theta = 0 \text{ 时, } C_0 &= \frac{\epsilon S}{\delta} \\ \text{当 } \theta \neq 0 \text{ 时, } C &= C_0 - C_0 \frac{\theta}{\pi} \end{aligned} \right\} \quad (3.4-1)$$

式中  $S$ —极板面积( $m^2$ )；  
 $\delta$ —极板间距离( $m$ )；  
 $\epsilon$ —极板间介质的介电常数( $F/m$ )；  
 $\theta$ —动极板角位移( $rad$ )。

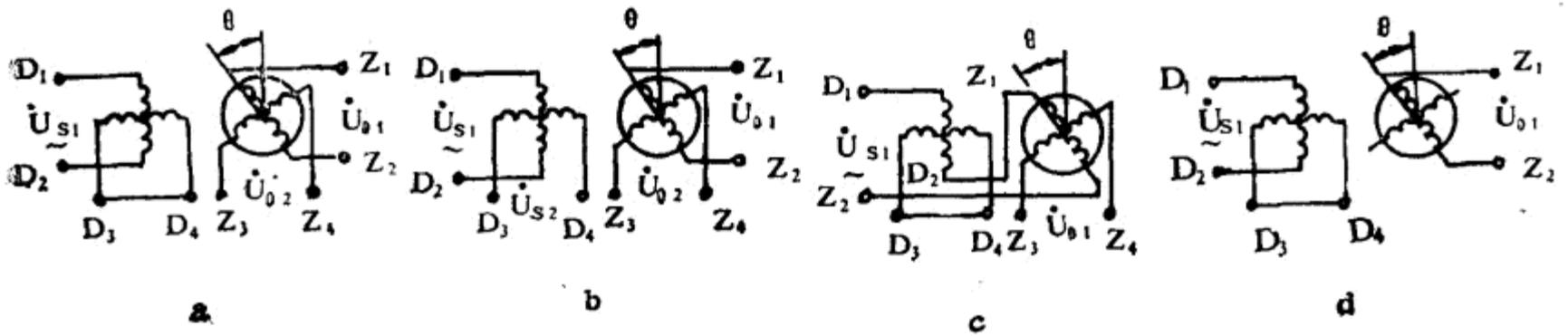


图 3.3.3 旋转变压器的电气原理图

a、b. 正余弦旋转变压器 c. 线性旋转变压器 d. 比例式旋转变压器

表 3.3.2 旋转变压器的主要性能

名称	含义	误差范围	备注
正余弦函数误差 $\delta_n$	正余弦旋转变压器一相激磁绕组以额定电压和频率激磁，另一相激磁绕组短接，在不同转角位置下，两相输出绕组的感应电势与理论正弦(或余弦)函数之差对最大理论输出电压之比	0.02~0.1%	产生误差主要原因是加工不良，和磁性材料不均匀，作为解算元件时，直接影响解算精度
线性误差 $\delta_x$	线性旋转变压器在工作转角范围内，不同转角时，实际输出电压与理论直线之差，对理论最大输出电压之比	0.02~0.1%	产生误差原因除加工不良，磁性材料不均匀外，还有设计原理误差，工作转角范围一般为 $\pm 60^\circ$
电气误差 $\Delta\theta_d$	正余弦旋转变压器在不同转角位置下，两个输出绕组电压的比所对应的正切或余切角度与实际转角之差。以角度表示	2'~10'	它包括了函数误差、零位误差、变比误差、阻抗不对称等，反映了旋转变压器的综合精度。电气误差大，使数据传输系统的精度下降
零位误差 $\Delta\theta_0$	正余弦旋转变压器一相激磁绕组短接，另一相激磁绕组在额定激磁状态下，两个输出绕组的电压为最小值时的转子位置叫作电气零位，零位误差为实际电气零位与理论电气零位( $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ )之差	2'~10'	磁路不对称，定、转子铁心不同轴、不圆，铁心片间短路、绕组分布不对称及匝间短路等都会产生零位误差。零位误差直接影响计算、数据传输系统精度
零位电压 $U_0$	转子处于电气零位时的输出电压(由与激磁电压频率相同，但相位相差 $90^\circ$ 的基波正交分量和与奇数倍激磁频率的高次谐波组成)	额定电压的 0.05~0.2%	磁性材料非线性、磁路不对称、气隙不均匀及绕组分布、电容影响等都会使零位电压升高。零位电压过高，使下级放大器饱和
输出相位移 $\varphi$	输出电压基波分量与输入电压基波分量的相位之差	$3^\circ \sim 12^\circ$	铁耗及原边绕组电阻影响

表 3.3.3

XZ 系列正—余弦旋转变压器主要性能

型 号	电 压 (伏)	频 率 (赫)	空 载 抗 阻 (欧)	电 压 比	摩 擦 力 矩 (克·厘米)	重 量 (克)				
12XZ 6—5	20	400	600	0.45	8	25				
12XZ 10—10			1000	1						
20 XZ 4—5	26	400	400	0.56	8	60				
20 XZ 6—4			600	0.45						
20 XZ 6—10			600	1						
20 XZ 10—4			1000	0.45						
20 XZ 10—7			1000	0.78						
20 XZ 10—10			1000	1						
20 XZ 10—20			1000	2						
20 XZ 20—4			2000	0.45						
20 XZ 20—10			2000	1						
28 XZ 4—1			36	400			400	0.15	8	130
28 XZ 4—4							400	0.45		
28 XZ 4—5							400	0.56		
28 XZ 6—4							600	0.45		
28 XZ 6—5							600	0.56		
28 XZ 6—10							600	1		
28 XZ 10—1							1000	0.15		
28 XZ 10—4							1000	0.45		
28 XZ 10—5							1000	0.56		
28 XZ 10—10							2000	1		
28 XZ 20—5	2000	0.56								
28 XZ 20—7	2000	0.78								
28 XZ 20—10	3000	1								
29 XZ 30—5	3000	0.56								
28 XZ 30—10	3000	1								
28 XZ 30—20	3000	2								
28 XZ 40—5	4000	0.56								
28 XZ 40—10	4000	1								
28 XZ 60—10	6000	1								
36 XZ 2—4	36	400	200	0.45	10	180				
36 XZ 2—5			200	0.56						
36 XZ 4—5			400	0.56						
36 XZ 6—1	60	400	600	0.15	10	180				
36 XZ 6—4			600	0.45						
36 XZ 6—5			600	0.56						
36 XZ 10—4			1000	0.45						
36 XZ 10—5			1000	0.56						
36 XZ 10—10			1000	1						
36 XZ 20—4			2000	0.45						

续表

型 号	电 压 (伏)	频 率 (赫)	空 载 阻 抗 (欧)	电 压 比	摩 擦 力 矩 (克·厘米)	重 量 (克)
36 XZ 20—5			2000	0.56		
36 XZ 20—7			2000	0.78		
36 XZ 20—10			2000	1		
36 XZ 20—20			2000	2		
36 XZ 30—1			3000	0.15		
36 XZ 30—5			3000	0.56		
36 XZ 30—10			3000	1		
36 XZ 40—5			4000	0.56		
36 XZ 40—10			4000	1		
36 XZ 40—20			4000	2		
36 XZ 60—5			6000	0.56		
36 XZ 60—10			6000	1		
36 XZ 100—5			10000	0.56		
45 XZ 4—1			400	0.15		
45 XZ 4—5			400	0.56		
45 XZ 6—4	115	400	600	0.45	10	400
45 XZ 6—5			600	0.56		
45 XZ 10—4			1000	0.45		
45 XZ 10—5			1000	0.56		
45 XZ 10—7			1000	0.78		
45 XZ 10—10			1000	1		
45 XZ 20—5			2000	0.56		
45 XZ 20—10			2000	1		
45 XZ 30—5			3000	0.56		
45 XZ 40—5			4000	0.56		
45 XZ 40—6			4000	0.65		
45 XZ 40—10			4000	1		
45 XZ 60—10	115	400	6000	1	10	400
45 XZ 100—5			10000	0.56		
55 XZ 2—5			200	0.56		
55 XZ 4—5	115	400	400	0.56	10	900
55 XZ 10—1			1000	0.15		
55 XZ 10—5			1000	0.56		
55 XZ 10—10			1000	1		
55 XZ 20—10			2000	1		
55 XZ 30—7	220	400	3000	0.78		
55 XZ 40—5			4000	0.56		
55 XZ 40—10			4000	1		
55 XZ 100—10			10000	1		

表 3.3.6 多极旋转变压器主要性能

型号	极对数	励磁电压 (伏)	最大输出电压 (伏)	输入阻抗 (欧)	输出阻抗 (欧)	剩余电压 (毫伏)	精度	重量 (克)	频率 (赫)
70 DXF 4 BTH	$\frac{1}{15}$	36	13/13	$\frac{7820}{353}$	—	—	—	700	400
70 DXB 4 BTH		12	1.25/6.5	$\frac{—}{370}$	$\frac{3225}{948}$	—	—		
90 DXF 4 BTH	$\frac{1}{16}$	36	12/13.5	$\frac{4500}{180}$	$\frac{196}{220}$	—	—		
90 DXF 4 CTH	$\frac{1}{15}$	36	12/13.5	$\frac{800}{353}$	—	—	$\frac{20'}{40''}$	1000	
90 DXB 4 CTH		12	13/13	286	—	—	—		
110 DXF 4 CTH	$\frac{1}{30}$	36	11.5/11	$\frac{3860}{144}$	$\frac{98}{210}$	—	—	1200	
110 DXF 4 C-1TH		36	11.5/11	$\frac{3800}{144}$	$\frac{98}{210}$	—	—		
110 DXB 4 CTH		12	17.5/8	$\frac{3500}{200}$	$\frac{1400}{1150}$	—	—		
110 DXB 4 C-1TH		12	17.5/8	$\frac{3500}{200}$	$\frac{1400}{1150}$	$\frac{—}{50}$	$\frac{20'}{30''}$		
110 DXF 4 ETH	$\frac{1}{15}$	36	12/24	$\frac{7800}{136}$	$\frac{90}{80}$	—	—	1200	
110 DXF 4 E-1TH		36	12/24	$\frac{7800}{136}$	$\frac{90}{80}$	—	—		
110 DXB 4 ETH		12	18/17.5	$\frac{3200}{850}$	$\frac{5000}{1200}$	—	—		
110 DXB 4 E-1TH		12	18/17.5	$\frac{3200}{850}$	$\frac{5000}{1200}$	—	—		
110 DXF 4 H	$\frac{1}{32}$	36	5/6	$\frac{1500}{207}$	$\frac{78}{113\sim 162}$	—	—	—	

图 3.3.4 为正余弦旋转变压器构成的控制式同步传输系统。其中 XF 作为发送机，变压器 XB 作为接收机。

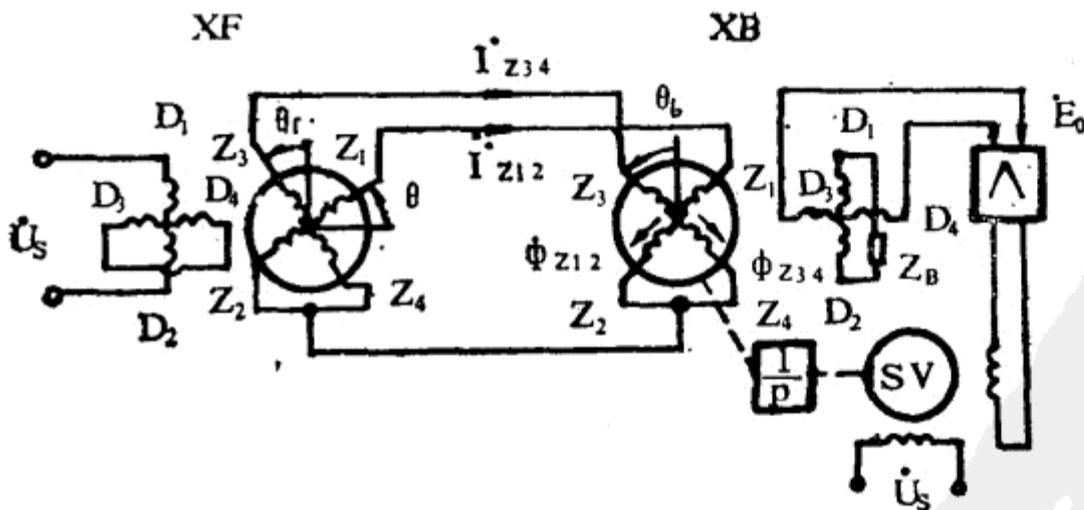


图 3.3.4 旋转变压器同步传输系统

这种系统也是工作在变压器工作状态。可以证明，当发送机定子一相加上电压  $U_s$  激磁，另一相短路。若转子绕组  $Z_3, Z_4$  相轴线相对定子绕组  $D_1, D_2$  相轴线转过  $\theta_r$  角，接收机 XB 转子绕组  $Z_3, Z_4$  相轴线相对定子绕组  $D_1, D_2$  相轴线转过  $\theta_b$  角时，XB 定子输出绕组  $D_3, D_4$  上所感生的电势为

$$\dot{E}_0 = kU_s \sin(\theta_b - \theta_f) \quad (3.3-2)$$

即输出电势同发送机与接收机转子转角差值的正弦成正比。它被放大后送入伺服电动机的控制绕组，该电机经减速器带动接收机  $XB$  的转子向  $\dot{E}_0$  减小的方向转动，直到  $\dot{E}_0 = 0$  时，即  $\theta_b = \theta_f$  时，便停止转动。这时  $XB$  和  $XF$  的两转子位置相协调，即  $XB$  转子跟随  $XF$  转子同向转过同样大小的角度，实现了机械角度的同步传输。

如果要进行角度和差控制，可以在发送机  $XF$  和接收机  $XB$  之间接入旋转变压器差动发送机  $XC$ 。如图 3.3.5 所示。

采用精密正余弦旋转变压器的传输系统，其精度一般比控制式自整角机传输系统高，可达 2~5 角分。

图 3.3.6 为旋转变压器用作直角坐标变换器的原理图。如图 3.3.6 (a) 所示，在定子的两相绕组上同时加上两个同相位的直角坐标信号电压  $\dot{U}_{s1}$  和

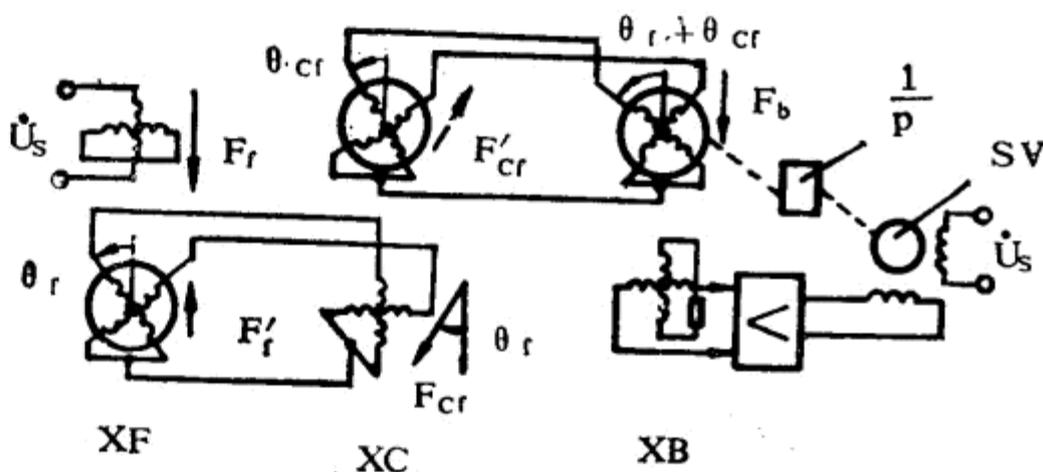


图 3.3.5 具有差动发送机  $XC$  的旋转变压器传输系统

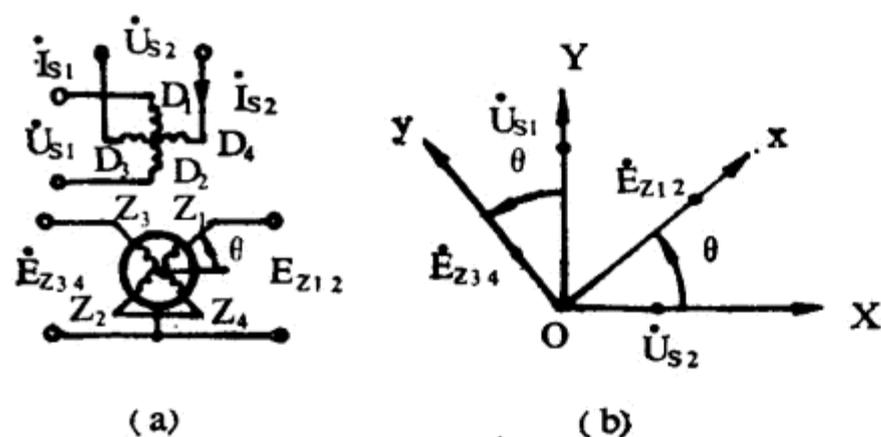


图 3.3.6 坐标变换器

$\dot{U}_{s2}$ ，由图可以导出由两转子绕组感生的代表转过  $\theta$  角新的直角坐标输出信号为

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{z_{12}} &= k_U (U_{s1} \sin\theta + U_{s2} \cos\theta) \\ \dot{E}_{z_{34}} &= k_U (U_{s1} \cos\theta - U_{s2} \sin\theta) \end{aligned} \right\} (3.3-3)$$

式中  $k_U$  为正余弦旋转变压器定、转子之间的变压比。输出、输入信号间的坐标关系见图 2.3.6 (b)

正余弦旋转变压器的另一种应用是线性旋转变压器，它可用作在一定转角范围内要求有严格线性输出特性的角度传感器。正余弦旋转变压器用作线性旋转变压器时，要求变压比限制在 0.55~0.6 之间，定子和转子的铜电阻和漏感抗应尽可能小，输出负载阻抗很大，并且按一定方式接线。图 3.3.7 是最常用的一种接线方式。由图可以得到

$$\dot{U}_0 = k_U U_s \frac{\sin\theta}{1 + k_U \cos\theta} \quad (3.3-4)$$

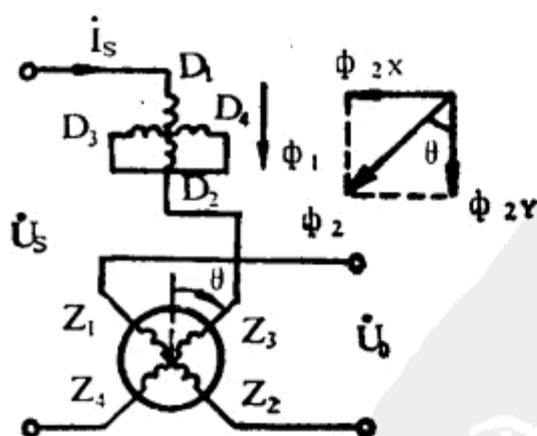


图 3.3.7 线性旋转变压器原理图

式中  $\dot{U}_0$ —输出电压；

$\dot{U}_s$ —激磁电压；

$k_U$ —旋转变压器的变压比， $k_U \approx \frac{N_z}{N_D}$ ， $N_z$  为转子输出绕组匝数， $N_D$  为定子绕组匝数；

$\theta$ —转子转角，见图 3.3.7。

对式 (3.3-4) 进行数学分析可知，当  $k_U = 0.5$  时，在  $\theta = \pm 37.4^\circ$  范围内， $\dot{U}_0$  同  $\theta$  成线性关系，其线性度理论上可达 0.1%。 $k_U$  值的大小对线性度和角度  $\theta$  的变化范围影响很大，见表 3.3.7。

表 3.3.7 Ru值对线性度和工作角度范围的影响

变压比 $k_U$	线性度 %	角度变化范围 $\theta$ (度)
0.5	$< 0.1$	$\pm 37^\circ$
	$< 0.5$	$\pm 55^\circ$
	$< 1.0$	$\pm 65^\circ$
0.55	$< 0.1$	$\pm 20^\circ$
	$< 0.5$	$\pm 80^\circ$
0.58	$< 0.5$	$\pm 35^\circ$
	$< 1.0$	$\pm 50^\circ$
0.60	$< 1.0$	$\pm 40^\circ$
	$< 2.0$	$\pm 60^\circ$

## § 3.3.2 自整角机

**工作原理** 自整角机又称交流同步机，它是一种感应型的机电元件。通常在同步传输系统中用两个或两个以上组合使用，在个别场合也可用作角度传感器。

自整角机有两种运行方式：控制式和力矩式。

图 3.3.8 为控制式自整角机同步传输系统的组成原理图。在控制式运行时，发送机  $Z_1$  的转子激磁，在气隙中形成正弦分布的脉动磁通，它在定子三相绕组中分别感应出相位相同、大小不等的变压器电势。这些电势在发送机及接收机的定子绕组中产生电流并形成磁场。可以证明，接收机定子合成磁场对转子输出绕组的夹角就等于接收机与发送机两转轴的转角差，即  $\theta_2 - \theta_1 = \delta$ 。如取  $\delta = 90^\circ$  时为协调位置，失调角  $\gamma = 90^\circ - \delta$ ，则接收机转子绕组输出电压与失调角的正弦函数成正比，即

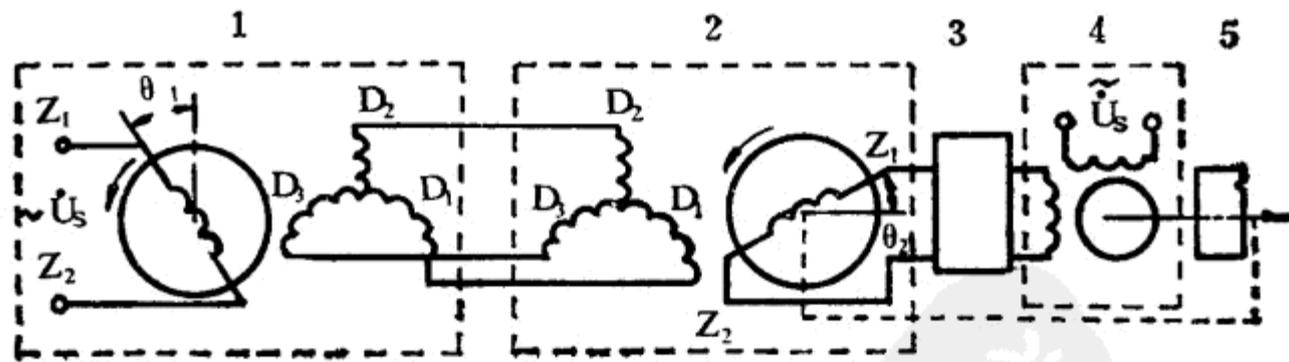


图 3.3.8 控制式发送机-自整角变压器系统工作原理

1. 控制式发送机 2. 自整角变压器 3. 放大器 4. 伺服电动机 5. 齿轮减速器

$$\dot{U}_0 = U_{0max} \sin \gamma \quad (\text{V}) \quad (3.3-5)$$

式中  $\dot{U}_{0max}$ —转子绕组最大输出电压。在小失调角时，输出电压与失调角成正比

$$\dot{U}_0 = U_{0max} \gamma \quad (\text{V}) \quad (3.3-6)$$

图 3.3.9 为力矩式自整角机同步传输系统的组成原理图。在力矩式运行时，发送机和接收机都要激磁。接收机定子横轴磁通（与转子绕组轴线垂直的磁通）与其激磁磁势相互作用产生整步转矩。整步转矩与失调角  $\delta$  的正弦函数成正比。在小失调角时与失调角  $\delta$  成正比。

如果需要指示两个转轴的转角之和或差时，可以使用差动式自整角机。自整角机的分类见表 3.3.8。

控制式自整角机和力矩式自整角机电气原理图分别如图 3.3.10 和图 3.3.11 所示。

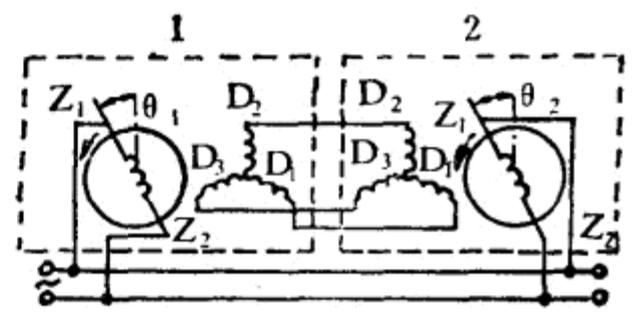


图 3.3.9 自整角机发送机-接收机工作原理

1. 自整角机发送机 2. 自整角机接收机

表 3.3.8 自整角机分类

分类	代号	结构特征		作用	
		定子	转子		
控制式	发送机	ZKF	隐极式，嵌有三相星形连接绕组，各绕组轴线在空间互距 $120^\circ$	凸极式或隐极式，嵌有单相绕组	将输入的转子转角变成电信号输出
	自整角变压器	ZKB	隐极式，嵌有三相星形连接绕组，绕组轴线在空间互距 $120^\circ$	隐极式，嵌有单相分布绕组	接收控制式发送机的电信号，变成与失调角相应的电信号输出
	差动发送机	ZKC		同控制式发送机	串接于发送机与自整角变压器之间，将发送机的转子转角及其自身转子转角的和（或差）变换成电信号输给自整角变压器
	接收机	ZLJ		同发送机，但加嵌阻尼绕组或带有机机械阻尼器	接收力矩式发送机的电信号，变换成转子转角输出
力矩式	发送机	ZLF	凸极式嵌有单相集中绕组	同控制式发送机	同控制式发送机
	接收机	ZLJ	同发送机，但加嵌阻尼绕组或带有机机械阻尼器	同控制式差动发送机	串接于力矩式发送机与接收机之间，将发送机的转子转角及其自身转子转角之和（或差）变换成电信号输给接收机
	差动接收机	ZCJ	同控制式差动发送机，但轴上带有机机械阻尼器	同控制式差动发送机	串接于两个力矩式发送机之间，接收两发送机输出的电信号，使转子转角为两发送机转子转角之和（或差）

注：电气原理图中的定、转子绕组相对位置，即为该种自整角机的基准电气零位。

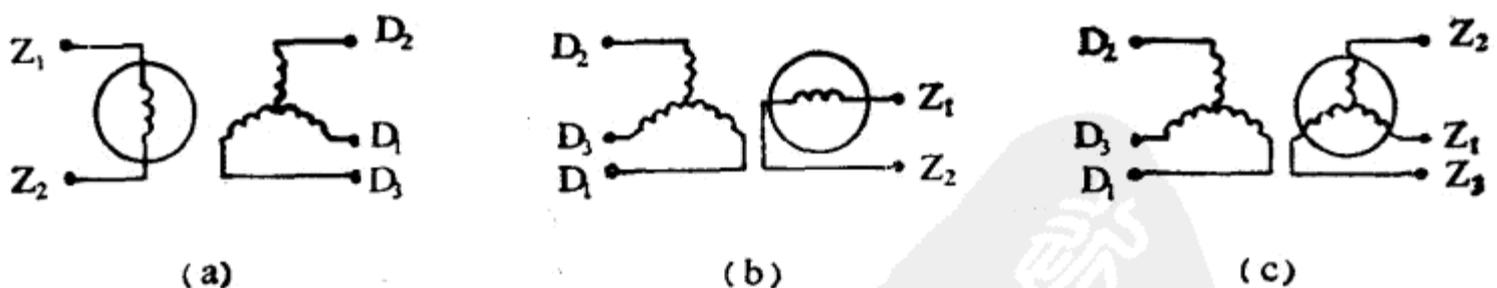


图 3.3.10 控制式自整角机电气原理图  
a. 发送机 b. 自整角变压器 c. 差动发送机

自整角机单独用作角度传感器时，转子激磁，而用定子的任意两相作为输出，另一相空着不用（图 2.3.12）。可以证明，在图 3.3.12 所示位置， $D_2$  和  $D_3$  两相的感应电势为