

「变压器」

旋转变压器信号数字化处理及应用

文/赵文香 刘玉晶 张 巍

论述了旋转变压器测角信号数字化处理方法和相关电路。

目前应用于伺服系统中的测角元件有多种,如光电数字测角装置虽然精度可以较高,但结构复杂,价格昂贵,在模拟测角装置加模块化的结构中,因抗干扰性能较差,目前尚未得到推广。光电脉冲编码器对作战的恶劣环境较难适应,其抗冲击性能也较差,不能满足使用要求。旋转变压器在环境耐受能力、抗干扰能力以及成本上较光电编码器有很大优势,具有精确、可靠和快速的特性。通过近十多年的研究及应用表明,旋转变压器作为测角元件是极其可靠的。基于旋转变压器的固有特征:测角精度高、寿命长、可靠性高和适应严酷的环境条件,因此它被广泛应用于坦克火控系统、地面火炮控制系统和舰船火控系统等军事装备中,鉴于上述这些系统的全面数字化,随之研制出旋转变压器专用的数字化器件:旋转变压器/数字转换器及数字转换器/旋转变压器转换器,使系统的硬件更明晰、简洁而且有效地提高了系统的可靠性,保证了装备的可靠、有效的工作,具体地阐述了信号数字化处理方法和电路。

测角原理

旋转变压器是一种将转子转角变换成与之呈某一函数关系的电信号元件,是自动控制系统中的微电动机。按不同用途可分为计算用旋转变压器和数据传输用旋转变压器两类。计算用旋转变压器主要用于坐标变换、三角运算、角度数字转换及移相器等,按其输出电压与转子转角之间的

函数关系,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3种。数据传输用旋转变压器按其系统中的具体用途可分为旋变发送机、旋变差动发送机和旋变变压器3种。按电动机极对数多少来分,可将旋转变压器分为单极和多极两种。

1. 正余弦旋转变压器

对于正余弦旋转变压器,一次侧施加单相交流电源励磁,二次侧的两个输出电压分别与转子转角呈正弦和余弦函数关系,利用这种对应的函数关系可以将旋转变压器作为角度测量元件。图1所示为正余弦旋转变压器的电气原理图。

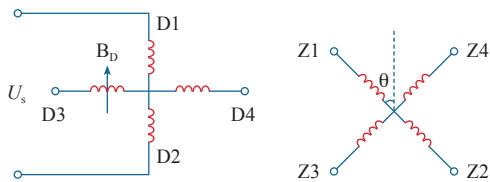


图1 旋转变压器电气原理图

设 Z_1-Z_2 、 Z_3-Z_4 、 D_3-D_4 开路,在 D_1-D_2 加交流励磁电压 U_s ,此时会在气隙中产生一个脉振磁场 B_D ,它的轴线在 D_1-D_2 轴线上。 B_D 将在 Z_1-Z_2 、 Z_3-Z_4 中感应电势,这些电势在时间上是同相位的,其有效值与该绕组的位置有关。

设励磁绕组和输出绕组的轴线重合时磁通 Φ_D 在该输出绕组中感应的电势为 E_R , Φ_D 在 D_1-D_2 中感应的电势为 E_D ,那么在 Z_1-Z_2 中,有

$$E_{R1} = E_R \cos \theta$$

在 Z_3-Z_4 中,有

$$E_{R2} = E_R \cos(90^\circ - \theta) = E_R \sin \theta$$

且

$$\frac{E_R}{E_D} = \frac{W_R}{W_D} = K$$

式中, W_D 为 D_1-D_2 的有效匝数; W_R 为输出绕组的有效匝数; K 为匝数比。

将以上式子整理得

$$E_{R1} = KE_D \cos \theta$$

$$E_{R2} = KE_D \sin \theta$$

如果忽略励磁绕组的电阻和漏抗, 则 $E_D = U_s$

所以

$$E_{R1} = KU_s \cos \theta$$

$$E_{R2} = KU_s \sin \theta$$

当 U_s 不变时, E_R 与 θ 有正弦关系。

Z_1-Z_2 为余弦绕组, Z_3-Z_4 为正弦绕组。

2. 多级旋转变压器

为了提高旋转变压器的精度(分辨率)研制出高精度的多极旋转变压器。对于多极旋转变压器来说, 其工作原理与单极旋转变压器完全相同, 只是输出电压的有效值随转子转角变化的周期不同而已。单极旋转变压器输出电压的有效值随转子角位置变化的周期是 360° , 而 p 对极的旋转变压器输出电压的有效值随转子角位置变化的周期是 $360^\circ/p$, 旋转变压器输出电压有效值与转子转角的关系如图2所示。

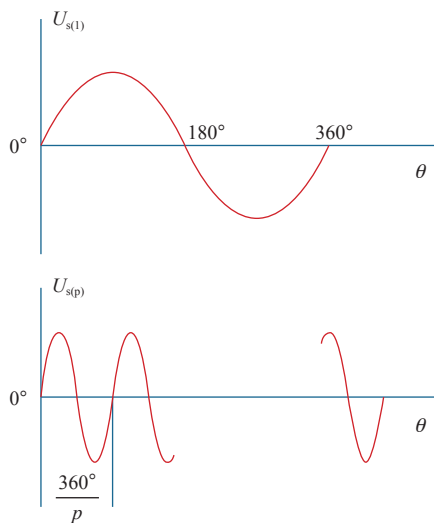


图2 旋转变压器的输出电压(两极和 p 对极)

当转子转角为 θ 时, 单极旋转变压器的正弦绕组输出电压为

$$U_{s(1)} = U_{m(1)} \sin \theta$$

p 对极旋转变压器的正弦绕组输出电压为

$$U_{s(p)} = U_{m(p)} \sin p\theta$$

式中, $U_{s(1)}$ 为两极旋转变压器输出电压最大有效值; $U_{s(p)}$ 为 p 对极旋转变压器输出电压最大有效值。 θ 为转子的实际空间转角, 一般称为机械角。 $p\theta$ 称为 p 对极旋转变压器的电角度。它们有以下关系

$$\text{电角度} = \text{极对数} p \times \text{机械角}$$

多极旋转变压器测角精度高是因为它本身的精度就高, 并且 p 对极旋转变压器将两极旋转变压器的电角度偏差由 δ 增加到 $p\delta$, 提高了小失调角时的输出电压, 相当于增大了小失调角时系统的开环放大倍数, 根据控制理论, 这样会明显减小系统误差。

3. 双通道的旋转变压器组合

无限制提高旋转变压器的极对数, 给制造带来较大的困难, p 大于8时制造上基本不可能了。为了进一步提高旋转变压器的精度(分辨率)往往采用双通道的旋转变压器组合。

在实际工程系统中, 经常需要机械粗-精啮合旋转变压器系统输出数字化, 以便得到表示轴角的单值数字。这类要求常常越来越多地由电气啮合的旋转变压器系统来实现。因为两类系统包含有相同的技术和粗-精系统机电方面的相关信息。

如果利用10位旋转变压器/数字变换器组成的双通道系统, 选择粗细之间的速比为 $1:64$, 即可把精度从10位提高为20位, 因为速比为 $1:64$, 精通道旋转变压器旋转一周, 而粗通道旋转变压器转角为 5.625° 。

按照系统测角的精度和分辨率要求来选定速比, 如已知精通道转换器为14位, 系统需要的分辨率为18位, 即需要提高四位, 则速比为 $1:16$, 上述的解算, 事实上是由计算双通道系统的分辨率的方法反推导而得到的。

计算系统的分辨率的程序步骤如下。

1) 确定的下一位二进制数 N , 假定速比为 $1:64$, 则 N 等于128。

2) 取对数 $\log_2 N$, 并减1。

$$\log_2 128 - 1 = 6$$

3) 加结果数, 系统的分辨率为

$$6 + 14 = 20$$

按照上述步骤可以计算出本系统在精转换器为14位、系统分辨率为20位时速比为 $1:64$ 。

粗-精转换系统的分辨率取决于粗-精速比

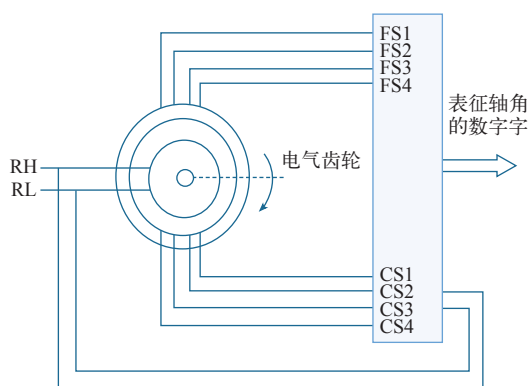


图3 双通道旋转变压器/数字转换器系统

和转换器的分辨率，速比越高和转换器的分辨率越高，整个系统的分辨率越高，很容易获得所期望的分辨率。对14位转换器，用于1:64的精轴系统，得到的分辨率为

$$360^\circ / (2^6 + 2^{20}) = 1.2''$$

粗—精机电系统的传输精度可表示为

$$B_i + C_i + S_i / N$$

式中， B_i 为齿轮箱的齿隙； C_i 为相对于粗轴啮合的圆周误差； S_i 为精旋转变压器的精度； N 为粗/精速比。

对于数字粗—精系统的传输精度需要把转换器的精度加到等式中，这样，整个系统的精度为

$$B_i + C_i + (D_i + S_i) / N$$

式中， D_i 为精转换器的精度。

从第三项 $(D_i + S_i)/N$ 可以看出系统精度与速比、精旋转变压器的精度和精转换器的精度有关。

在本系统中，精转换器为14位，即

$$D_i = \pm 4.5'$$

其他部分精度为

$$S_i = \pm 10''$$

$$B_i = \pm (1/2)'$$

$$C_i = \pm (1/4)'$$

$$N = 1:64$$

系统精度为

$$(1/2)' + (1/4)' + (4.5 + 1/6)' / 64 = 0.82'$$

信号数字化处理

为了适应系统的计算机控制，需要将旋转变压器输出的四线交流信号转换成数字量，在R/D器件未研制出前往往采用图4框图处理方法。

在研制出R/D（或S/D）和D/R（或D/S）等器件，信号数字化变得简便、直观。图5表示粗—

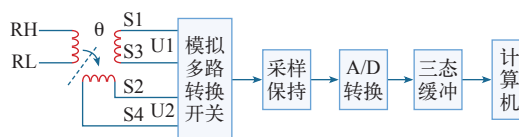


图4 信号处理框图

精旋转变压器组合系统数字化线路图。表征轴角 θ 的 $CS_1 \sim CS_4$ 和 $FS_1 \sim FS_4$ 的四线交流输出电压直接输入粗—精旋转变压器/数字转换器转换成粗、精数据，再输入双速率处理器和三态锁存器，即可得到表征轴角 θ 的19位数字，计算机接收上述数字量，进行实时控制。

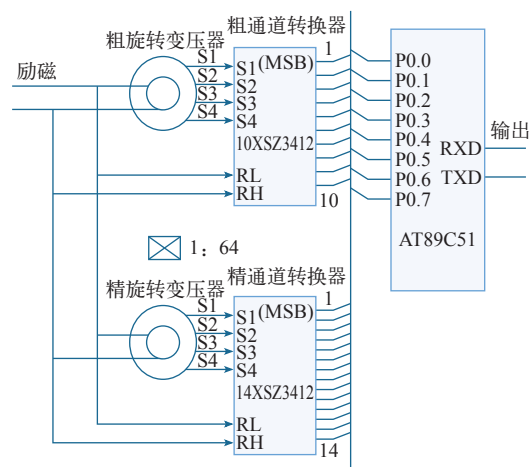


图5 一种粗—精旋转变压器组合系统数字化线路图

结束语

选用旋转变压器数字转换器对旋转变压器输出的电压模拟量进行A/D转换，改变了以往的采用电阻衰减网络、多路开关、采样/保持放大器、A/D转换器转换为数字量方式，使电路元器件数量减少、集成度提高，控制简单，处理速度加快，简化了数字处理线路，提高了系统的可靠性。采用粗细组合方式对粗轴读数和精轴读数进行粗细组合，提高了传感器的测角精度。该系统在使用过程中，不需要调整旋转变压器的零位，用软件可以设置零位，减少了零位调试的过程，使用方便。用软件实现多极旋转变压器粗、精机组合的速比要改变时需更换相应部分的具体值即可，因此该方法具有普遍意义。用软件实现粗、精机轴角组合的方法较之硬件实现的组合方法更经济实用。EA

（收稿日期：2017.06.19）

（编辑：刘群焱）