

文章编号: 1672-8785(2006)04-0042-05

高精度圆感应同步器高速数据处理电路研究

尚 超

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 圆感应同步器是一种精密的角位置传感器, 其高精度高速数据处理电路意义重大。本文分析比较了圆感应同步器不同的激磁方式及输出检测方式, 介绍了绝对角度测量原理、IRDC 芯片及绝对式感应同步器角度测量电路的误差来源, 最后给出了初步的研究结论。

关键词: 高精度; 感应同步器; 角度测量; IRDC

中图分类号: TP212.9 **文献标识码:** A

Study of High-speed Data Processing Circuit for High Accuracy Rotary INDUCTOSYNTM

SHANG Chao

(Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Rotary INDUCTOSYNTM is a kind of high accuracy angular position transducers and its high accuracy high-speed data processing circuit is an important part. In this paper, the different exciting and measuring modes of the INDUCTOSYNTM are analyzed comparatively. The principle of absolute angular position measurement, the IRDC ICs and the error sources of the angle measuring circuit of the absolute INDUCTOSYNTM are presented. Finally, the elementary study conclusions are given.

Key words: high accuracy; INDUCTOSYNTM; angular measurement; IRDC

1 引言

圆感应同步器是 20 世纪 50 年代美国 FAR-RAND 公司根据美国空军提出的要求研制的。由于它具有测量精度高、受环境影响小、使用寿命长、维护简便、抗干扰能力强、工艺性好、成本低等优点, 在航天技术、军事目标跟踪等外场环境下有广泛的应用前景。如何进一步提高精度和跟踪速度(及跟踪加速度)是今后感应同步器角度测量系统的发展方向。

2 圆感应同步器的结构和原理

圆感应同步器在结构上是一种多极感应元

件, 由于多极结构的误差补偿作用, 所以具有很高的精度。它具有两个平面形的矩形绕组, 相当于变压器的初级和次级绕组。图 1 和图 2 显示了圆感应同步器的几何结构和等效电气结构。

圆感应同步器是应用电磁感应定律把位移量转换成电量的一种传感器。通过两个线圈的互感变化来检测其相互位置, 因此工作时必须要有激磁电源来产生一定关系的磁场。随着测量精度的提高, 对激磁电源的要求也越高。

感应同步器激磁电源一般是采用正(余)弦波, 但是也有使用方波进行激磁的。激磁频率一般为 2kHz ~ 10kHz。

收稿日期: 2005-08-29

作者简介: 尚超(1981—), 男, 哈尔滨工程大学电子科学与技术专业本科毕业, 现为中科院上海技术物理研究所博士研究生, 从事高精度高速角位置测量与控制技术的研究。

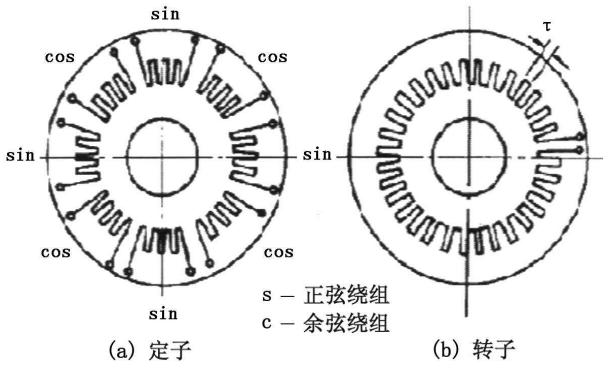


图 1 圆感应同步器几何结构图

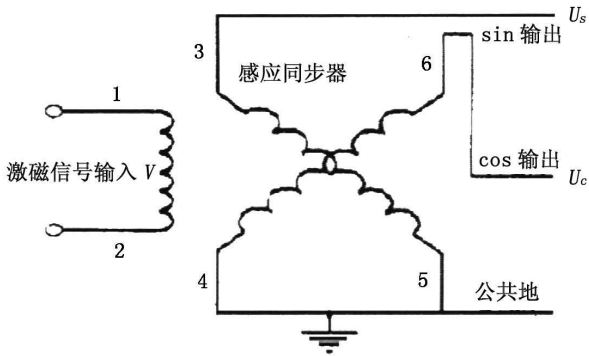


图 2 等效电气图

3 圆感应同步器激磁方式的比较

圆感应同步器的激磁方式有两种: 双相(分段绕组)激磁单相(连续绕组)输出和单相(连续绕组)激磁双相(分段绕组)输出。

双相激磁单相输出是指分段绕组激磁连续绕组输出。设分段绕组 A、B 的激磁电压分别为 u_A 、 u_B ，由于感应同步器是线性感应元件，所以可以采用线性系统的叠加定理，则连续绕组 C 产生的感应电动势 e 为

$$e = e_{AC} + e_{BC} = -\frac{k}{\omega_A} \left(\frac{du_A}{dt} \cos \alpha_D - \frac{d\alpha_D}{dt} u_A \sin \alpha_D \right) - \frac{k}{\omega_B} \left(\frac{du_B}{dt} \sin \alpha_D + \frac{d\alpha_D}{dt} u_B \cos \alpha_D \right) \quad (1)$$

式中， k 为耦合系数， $\frac{d\alpha_D}{dt} = \omega_D$ 是电气角速度， $\alpha_D = \frac{Nx}{2}$ 是电气角度 (x 是机械角度， N 为感应同步器极数)， ω_A 、 ω_B 分别为 A、B 的激磁频率。

单相激磁双相输出是指连续绕组激磁分段绕组输出。设连续绕组 C 的激磁电压为

$$u_c = U_m \cos \omega t \quad (2)$$

分段绕组 A、B 的瞬时感应电动势分别为

$$\begin{cases} e_A = kU_m \left(\sin \omega t \cos \alpha_D + \frac{\omega_D}{\omega} \cos \omega t \sin \alpha_D \right) \\ e_B = kU_m \left(\sin \omega t \sin \alpha_D - \frac{\omega_D}{\omega} \cos \omega t \cos \alpha_D \right) \end{cases} \quad (3)$$

两种激磁方式各有其优缺点。首先采用双相激磁电源时，正弦、余弦的正交性要求加大了电源设计的复杂度。而单相激磁则没有这个要求，但是其输出在理论上却是两相交流信号，这使得后续数据处理电路的复杂度上升。第二，由于感应同步器是线性感应元件，它的磁路和电路都不会饱和，因此无论采用何种激磁方式，由感应同步器误差导致的误差是相同的^[1]。由于设计调试两相正交电源比设计调试没有功率输出的两相信号处理电路更困难，采用单相激磁方式成为设计动态高精度感应同步器测角系统的新的研究方向^[2]。

4 圆感应同步器输出检测方式

由于感应同步器的输出是交流电势，所以测量电路有幅值检测和相位检测两种检测方式。幅值检测就是根据感应电势的幅值来检测角位移的工作方式，相位检测方式是根据感应电势的相位来检测角位移的工作方式。

幅值检测方式按照激磁方式有双相激磁单相输出幅值检测和单相激磁双相输出幅值检测两种方式。如果采用双相激磁单相输出幅值检测工作方式，分段绕组的激磁电压同频，同相，但幅值不等，即

$$\begin{cases} u_A = U_m \sin \theta \sin \omega t \\ u_B = -U_m \cos \theta \sin \omega t \end{cases} \quad (4)$$

代入式 (1) 得

$$e = kU_m \cos \omega t \sin(\alpha_D - \theta) + \frac{k\omega_D}{\omega} \sin \omega t \cos(\alpha_D - \theta) \quad (5)$$

根据式 (5) 可见，当 e 幅值为 0 时， $\alpha_D = \theta$ 。

如果采用单相激磁双相输出幅值检测方式，感应同步器的输出如式 (3) 所示，进行变换得

$$e = e_A \sin \varphi - e_B \cos \varphi$$

$$= kU_m \sin wt \sin(\varphi - \alpha_D) - kU_m \frac{w_D}{w} \cos wt \cos(\varphi - \alpha_D) \quad (6)$$

由式 (12) 可见, 当 e 幅值为 0 时, $\alpha_D = \varphi$ 。

两种幅值检测方式都是通过可控角变量来跟踪待测电气角度并实现角度测量的, 因此都需要用函数变压器进行相应的转换, 见式 (5) 和式 (6)。两者的不同之处在于双相激磁幅值检测是通过可控角变量控制函数变压器对激磁电源进行函数变换, 而单相激磁幅值检测则是对感应同步器的双相输出进行函数变换。

相位检测方式按照激磁方式有双相激磁单相输出相位检测和单相激磁双相输出相位检测两种方式。如用双相激磁单相输出相位检测工作方式, 转子的正余弦绕组的激磁电压同频、等幅, 但相位相差 90° , 即

$$\begin{cases} u_A = U_m \cos wt \\ u_B = U_m \sin wt \end{cases} \quad (7)$$

把式 (7) 代入式 (1) 得

$$e = -kU_m \left(1 - \frac{w_D}{w}\right) \sin(wt - \alpha_D) \quad (8)$$

可见输出的感应电动势的相位角就是待测电气角 α_D , 这就是相位检测方式的理论依据。

单相激磁双相输出相位检测方式原理如下: 将式 (3) 移相 $\frac{\pi}{2}$, 得

$$\begin{cases} e_{A1} = kU_m \left[\sin \left(wt + \frac{\pi}{2} \right) \cos \alpha_D + \frac{w_D}{w} \cos \left(wt + \frac{\pi}{2} \right) \sin \alpha_D \right] \\ = kU_m \left(\cos wt \cos \alpha_D - \frac{w_D}{w} \sin wt \sin \alpha_D \right) \\ e_{B1} = kU_m \left[\sin \left(wt + \frac{\pi}{2} \right) \sin \alpha_D - \frac{w_D}{w} \cos \left(wt + \frac{\pi}{2} \right) \cos \alpha_D \right] \\ = kU_m \left(\cos wt \sin \alpha_D + \frac{w_D}{w} \sin wt \cos \alpha_D \right) \end{cases}$$

进一步得

$$\begin{cases} e_1 = e_A - e_{B1} = kU_m \left(1 - \frac{w_D}{w}\right) \sin(wt - \alpha_D) \\ e_2 = e_B + e_{A1} = kU_m \left(1 - \frac{w_D}{w}\right) \cos(wt - \alpha_D) \end{cases} \quad (10)$$

式中, e_1 、 e_2 均可作为相位检测的信号。

综上所述, 单相激磁双相输出相位检测方式需要对感应同步器输出信号作进一步的变换处理, 因此后续处理电路较复杂, 但激磁电路较简单。另外, 根据式 (8) 可见, 从理论上讲双相激磁单相输出相位检测方式不存在动态误差, 从这一点考虑, 这种方式优于其它方式。

相位检测和幅值检测方式都被广泛应用。相位检测方式的电路虽然简单, 但是它有一系列的缺点, 如: (1) 必须满足阻容参数匹配, $\omega RC = 1$, 这样对元件的温度和时间稳定性就要求严格, 同时对电源频率稳定性要求也较苛刻; (2) 对噪声信号, 电压中的正交分量以及谐波分量要求严格, 特别是在零位时。而随着高集成度的元件以及新的控制方式的出现, 幅值检测方式应用得更为广泛了 [3]。

5 绝对式感应同步器测量方案

感应同步器输出信号中的电气角与实际位移角的关系如下:

$$\alpha_D = \frac{2\pi x}{T}$$

式中, T 为感应同步器的输出周期, 一般情况下 $T = 2\tau$, 即感应同步器的输出是以 2τ 为周期的信号。 τ 为感应同步器的极距, 因此感应同步器的测量范围是

$$\varphi = 360^\circ \left/ \frac{N}{2} \right. \quad (11)$$

式中, N 为感应同步器的极数。可见一般的感应同步器无法测量绝对机械角度。

绝对角度测量系统一般都采用粗精双通道测量方案, 其测角范围为 $0^\circ \sim 359.9999^\circ$, 精度为 $0.0001^\circ (0.36'')$ [4]。粗精双通道测量一般使用旋转变压器和感应同步器相结合的方式, 也可以使用具有粗精两套线圈的绝对式感应同步器作为传感器件。双通道测角系统的原理框图如图 3 所示。

通过图 3 可以看出, 粗精两个通道在实现上是相对独立的两套系统。两个通道可以有相同之处, 例如激磁方式、检测方式和计数方法等, 因此有些系统把两个通道通过粗精切换开关组

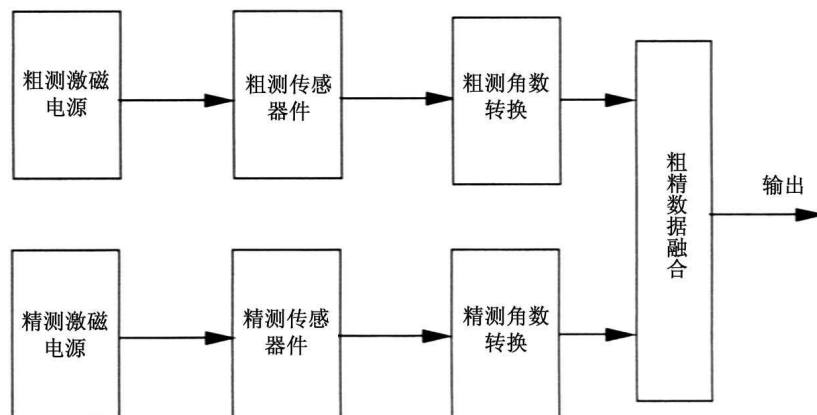


图 3 双通道测角系统原理框图

合起来^[2]。但粗精通道性能指标不同,因此高速高精度测量不宜使用粗精切换方式。此外,两个通道的测量数据必须采用适宜的粗精融合算法。

6 IRDC 模块

随着大规模集成电路技术和数字处理技术的发展,近年来出现了适应于感应同步器数据处理的特殊模/数转换芯片——感应同步器/旋转变压器数字转换器(IRDC)及其逆转换芯片。采用专用集成芯片对感应同步器的输出信号进行数字变换,具有体积小、结构简单、可靠性高、易于调试和多种信号输出模式等优点。

IRDC 芯片除了提供数字化的角度信号以外,还可以提供模拟量的速度信号和转动方向信号。其主要技术参数有:

①分辨率。它以数字输出的位数表示。

②精度。一般指稳态的,它的精度主要取决于正余弦乘法器的精度,其次是取决于斯科特转换器,并与参考电压和激磁电压也有一定关系。同型号的产品具有不同的精度,因此在选择时必须注意这一点。

③跟踪速率。它和参考电压频率有关,参考频率低,跟踪频率也低,输出位数高的,跟踪速率相应也降低。

④信号电压幅值。不同厂家的转换器都对被测信号和参考信号的幅值有规定,如果不符,必须采取衰减或放大措施。

⑤容许相位差。被测信号和参考信号都有相位差,这会产生附加误差。因此必须采取补偿措施,进行移相来消除这个误差。

⑥动态参数。它包括加速度常数和阶跃响应时间。

设计系统时,要根据这几点来选择符合系统要求的芯片。

目前国内还没有这样高集成度的模块,但是已经有功能相同的厚膜电路,性能也很好,只是尺寸偏大。国外有名的生产厂商有 AD、CSI、ILC、DDC 等公司。这些集成芯片都是采用适时跟踪反馈原理进行数字转换的。这种方法有很多优点,如没有静态误差、工作频带宽、抑制噪声能力强等^[2]。除了角度数字转换芯片以外,这些公司还提供相关的功能芯片,如功率振荡器、前置放大器、双通道角度数字转换器、位数可变角度数字转换器等。

常用的 IRDC 有 AD 公司的 AD2S83、AD2S90 以及 CSI 公司的 268B300 等。还有一些较老的产品如 AD 公司的 IRDC1730 和 IRDC1731 已经停产。AD2S83 是位数可变的 RDC,AD2S44 是低功耗 14 位双通道 S/RDC,AD2S90 是低功耗完全 12 位 RDC,AD2S99 是可编程振荡器,AD2S1200 是带参考振荡器的 12 位 RDC。而 CSI 公司的产品则有成套的芯片可供选用,例如 12 位 IRDC 芯片 268B300 可以和振荡器 210A100 及前放 220A100 配套使用。参考文献 [5] 论述了 AD2S90 在感应同步器角度测量系统中的应用。

7 主要误差源分析

双通道感应同步器测角系统的误差主要是由感应同步器的误差和角度数字转换电路的误差组成的。

其中感应同步器的误差按照来源可分为原理性误差、工艺性误差和条件性误差。原理误差是元件固有的,随着设计水平的提高,这类误差可以大大减小。工艺误差是指工艺不善导致的误差,例如刻线不准,绕组不平等。这类误差往往是感应同步器误差的主要成分。条件误差是指由测试或运行条件不当引起的,例如安装误差,这类误差可以靠改变条件来消除^[2]。不管是哪一类误差,最终都反映在感应同步器的基本误差中。因此感应同步器在测试和运行之前,应该进行妥善的机械安装和调整^[1]。此外,激磁电源的不稳定也会造成感应同步器的输出误差,因此激磁电源误差也需要考虑在内^[6]。

在使用专用的角度数字转换芯片以后,转换电路的误差是由所使用的芯片的精度决定的。因此设计系统时应根据系统精度要求来选择合适的芯片。粗精通道的数据融合也会引入一定的误差,因此应该选择合适的融合方法^[1,7]。

为了提高系统的精度,必须减小上述误差,但实践表明,精度达到一定程度后,用提高制作精度的方法来提高测量精度是有限的或不经济的。随着电子技术的发展,误差补偿技术在感应同步器测角系统中被广泛采用。目前的误差补偿方式有硬件补偿、软件补偿和软硬结合三种方式^[8]。关于感应同步器测角系统的误差分析和补偿技术,国内和国外都进行了广泛的研究。但多数研究是针对非 IRDC 系统的,如参考文献^[9,10]。而针对 IRDC 感应同步器测角系统的误差分析及补偿技术的文献不多。

总的来说,为了减小系统的误差,一方面要选择品质优良的感应同步器,并进行妥善的机械安装;另一方面,在设计过程中应引入误差补偿技术。

8 结论

经过分析比较,初步得到以下结论:

1. 感应同步器单相激磁方式优于双相激磁方式;
2. 感应同步器的幅值检测方式优于相位检测方式;
3. 可以采用粗精双通道测量方案来提高测量系统的性能;
4. 专用集成 IRDC 芯片测量方案成为新的趋势;
5. 感应同步器的机械安装误差会影响测量精度;
6. 需要使用误差补偿技术以提高测量精度。

参考文献

- [1] 陆永平,岑文远. 感应同步器及其系统 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [2] 陆仲达. 鉴幅型感应同步器动态测角方案研究 [J]. 测试技术学报, 2003 年第 17 卷第 11 期, 18-51.
- [3] 曲家骥,王季秩. 伺服控制系统中的传感器 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.5, 76-117.
- [4] 曾庆双,刘升才. 一种双通道测角系统设计 [J]. 中国惯性技术学报, 1996 年第 4 卷第 2 期, 38-43.
- [5] 杨雄. 用于感应同步器的数字转换芯片 AD2S90 [J]. 国外电子元器件手册, 2002 年第 1 期, 42-44.
- [6] 曾鸣,迟红盛,王毅,等. 感应同步器开环激磁电源的设计 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 1999.4, 20-24.
- [7] 刘升才,王茂,曾庆双,等. 双通道测角系统中的粗精耦合问题 [J]. 黑龙江自动化技术与应用, 1994 年第 2-3 期, 105-108.
- [8] 端木时夏,刘纪荀,陈健. 感应同步器及其数显技术 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1990.11.
- [9] Y A Wu. On-orbit Calibration of Inductosyn Error [C]. Proceedings of the American Control Conference Baltimore, Maryland, June 1994.
- [10] Du Chunyang, Yang Guijie. Error Analysis and Compensation for Inductosyn based Position Measuring System [J]. IEEE, 2003, 0-7803-7883-0/03.