

# 感应同步器测角系统误差分析及补偿<sup>\*</sup>

娄莉娜, 朱革, 王先全, 武亮

(重庆理工大学 电子信息与自动化学院, 重庆 400050)

**摘要:** 利用感应同步器的误差特性, 研究其误差组成与分布规律——各次谐波误差沿空间正弦分布, 同时, 研究一种误差补偿方法, 详细比较了搜索法和非线性转换为线性方程两种误差补偿的优缺点, 把沿空间正弦分布的非线性误差转化成线性误差, 利用最小二乘法进行线性误差补偿其法拟合速度快, 精度高。最后, 通过实验测试, 该方法可以大幅度提高感应同步器的精度。

**关键词:** 感应同步器; 角度测量; 误差补偿

**中图分类号:** TH712      **文献标识码:** A

## Error Analysis and Compensation of Inductosyn Angle Measuring System

LOU Li-na, ZHU Ge, WANG Xian-quan, WU Liang

(School of Electronic Information and Automation, Chongqing 400050, China)

**Abstract:** Using error characteristics of inductosyn, studies its erroneous composition and the distribution rule—various subharmonics error along the space sine distribution, simultaneously, studies one error compensation method, a detailed comparison of the search method and converted to a linear equation of two kinds of non-linear error compensation of the advantages and disadvantages, transforms the miss distance along the space sine distribution's misalignment error, the use least squares method carries on the miss distance compensation, the method fitting speed is quick, the precision is high. Finally, through testing experiment, this method may enhance the precision of the induction synchro mesh.

**Key words:** inductosyn; angle measurement; error compensation

## 0 引言

随着电子技术的发展, 对感应同步器的精度要求越来越高, 而感应同步器的制造和安装精度因受到加工工艺的限制而难以再进一步提高, 因此可以通过补偿方法加以消除或抑制, 误差补偿技术在感应同步器测角系统中也被广泛采用。

本文将讨论短周期 1 内的谐波误差的研究与补偿技术。

## 1 感应同步器的基本原理

在感应同步器正弦绕组 S、余弦绕组 C 上施加幅值和频率相同、相位差 90° 的交流激磁电压, 即<sup>[4]</sup>:

$$u_s = U_m \sin \omega t \quad (1)$$

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

由感应同步器感应信号原理可知, 两个激磁绕组分别在连续绕组上感应的电势, 其感应电势分别为  $e_s$

和  $e_c$ , 即<sup>[5-7]</sup>:

$$e_s = k_0 U_m \sin \cos \theta t \quad (3)$$

$$e_c = k_0 U_m \cos \sin \theta t \quad (4)$$

其中:  $k_0$ ——为变比;

——为电气角;

$\omega$ ——激磁信号角频率。

应用叠加原理可知连续绕组感应电势  $e$  有:

$$e = e_s + e_c = 2k_0 U_m \sin(\theta + \omega t) \quad (5)$$

式 (1) 和式 (5) 都是相同频率的正弦信号, 它们的初相位相差  $\theta$ , 对应相应的角度。可以通过比较它们的相位差, 进而检测感应同步器转子相对定子的角度。

## 2 感应同步器的误差分析

感应同步器除了引起以 360° 为周期的长周期的较大的谐波误差之外, 还有以 1° 为周期的短周期谐波误差。本文研究其短周期谐波误差, 即感应同步器对极内

收稿日期: 2009 - 12 - 02

\* 基金项目: 重庆市自然科学基金项目 (CSTC, 2008BB2336)

作者简介: 娄莉娜 (1984—), 女, 河南开封人, 重庆理工大学硕士研究生, 主要研究方向为计算机辅助测试技术与仪器, (E-mail) loulina229@cqut.edu.cn

的误差;以 360 为周期的长周期误差将在以后讨论。对感应同步器对极内的误差,采用各点测试的方法,将得到的各个误差值进行绘图便可得到误差曲线。根据傅立叶级数进行误差分离,并对误差进行谐波分解:

$$i = \sum_{j=0}^N y_j \cos\left(\frac{360^\circ}{n} i + \phi_j\right) \quad (6)$$

其中  $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$ ;  $n$  为感应同步器一周分度误差的测试点数,  $y_j$  为谐波测角误差幅值,  $\phi_j$  为对应初相角。

如果  $y_j$  和  $\phi_j$  逐个求解,就得出误差规律,该误差是以对极为周期。

### 3 误差补偿

根据以上分析,可采用两种算法来求解最小误差。

#### (1) 简单搜索法

简单搜索法是在未知变量比较少的情况下,假设只有一个变量未知,而对其他未知变量赋值,然后求得未知的量。多次赋值便可求得多个未知量的值。

本文式(6)中只有  $y_j$  和  $\phi_j$  未知,便可先假设  $\phi_j$  为已知,将其值带入式(6)可求出对应的  $y_j$ ,然后计算出  $\sum_{j=1}^N y_j^2$  的值。假设不同的  $\phi_j$ ,便可以得到多个  $\sum_{j=1}^N y_j^2$  的值,对这些  $\sum_{j=1}^N y_j^2$  值进行比较,从中选择最小值,即取得最小值时的  $N$  值。

该方法的特点是方法简单,但是有很大的盲目性,而且需要多次比较,也很费时。

#### (2) 非线性转换为线性

感应同步器的误差中有很大一部分都具有一定的规律性,但这些误差都是以非线性的形式存在的。可以通过一定的函数转换,将非线性关系转换为线性关系,从而采用线性回归分析方法,来解决非线性问题。

将(6)式的非线性转换为线性,即:

$$i = y_0 + y_{xj} \sum_{j=1}^N \sin\frac{360^\circ}{n} ij + y_{yj} \sum_{j=1}^N \cos\frac{360^\circ}{n} ij \quad (7)$$

因为(7)中  $n$  和  $i$  都为已知,故式(7)可写为线性方程如下:

$$i = y_0 + y_{x1}A_{1i} + y_{y1}B_{1i} + y_{x2}A_{2i} + y_{y2}B_{2i} + \dots \quad (8)$$

对照式(7)和式(8)可知

$$A_{1i} = \sin\frac{360^\circ}{n} i \quad B_{1i} = \cos\frac{360^\circ}{n} i$$

$$A_{2i} = \sin\frac{360^\circ \times 2}{n} i \quad B_{2i} = \cos\frac{360^\circ \times 2}{n} i$$

$$\dots$$

$A_i, B_i$  均为常数,故所求即为  $y_0, y_{xj}, y_{yj}$ , 其中  $i = 1, 2, 3, \dots$

非线性误差转化成线性误差,利用最小二乘法进行线性误差补偿其拟合速度快,精度高。根据以上分

析,本文中采用第二种算法来求解最小误差。

### 4 线性最小二乘法处理

最小二乘法原理是测量结果的最可信赖的值,应在残余误差平方和为最小的条件下求出。最小二乘条件给出的最终结构能充分地利用误差的抵偿作用,有效地减小随机误差的影响。

由式(8)可知,误差方程已经转换为线性方程,所以可以直接用线性参数误差方程式进行最小二乘法计算。最小二乘法可以将误差方程转化为有确定解的代数方程组,从而可求解这些未知参数。

在等精度测量中,应满足最小二乘条件式,即<sup>[2]</sup>:

$$\sum_{i=1}^n v_i^2 = v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_n^2 = \text{最小} \quad (9)$$

正规方程可表示为:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nj} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

即:  $A^T V = 0$  这是等精度测量情况下以矩阵形式表示的正规方程。

又因误差方程式为  $V = L - AX$ , 其中  $L$  为已经获得的直接测量结果,  $X$  为待求的被测量的估计量,  $V$  为直接测量结果的残余误差,  $V, L, A, X$  均为列向量。代入式(10)正规方程又可表示为:

$$A^T L - A^T A X = 0 \quad (11)$$

即:

$$(A^T A) X = A^T L \quad (12)$$

若令

$$C = A^T A \quad (13)$$

若  $A$  的秩等于  $t$ , 则矩阵  $C$  是满秩的,那么  $X$  必定有唯一解。由式(11)(12)(13)就可得到正规方程解的矩阵表达式:

$$X = C^{-1} A^T L$$

得出正规方程的表达式,我们通过编程的运算可以得出矩阵  $X$  的值。

其中:

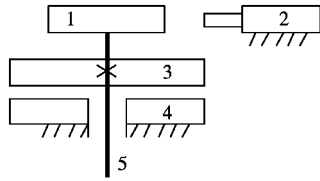
$$L = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \dots \\ i \\ \dots \\ n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_{x1} \\ y_{y1} \\ \dots \\ y_{xn} \\ y_{yn} \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} 1 & A_{10} & B_{10} & \dots & A_{n0} & B_{n0} \\ 1 & A_{11} & B_{11} & \dots & A_{n1} & B_{n1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & A_{1i} & B_{1i} & \dots & A_{ni} & B_{ni} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & A_{1n} & B_{1n} & \dots & A_{nn} & B_{nn} \end{bmatrix}$$

### 5 测试实例

感应同步器测试系统如图 1 所示,感应同步器的定子固定在基座上,转子和激光干涉仪的测头通过主

轴相连,一起随主轴转动,激光发生器固定到机架上。激光干涉仪的测试精度为 0.5。

每转动一个位置,分别读出感应同步器的示值和激光干涉仪的示值,它们之差就是感应同步器在该位置的误差。



1. 干涉仪探测器 2 激光测头 3 转子 4 定子 5 主轴

图 1 感应同步器测试系统

圆感应同步器测角系统进行初次检测后,其测试结果如下的 2 组数据所示,第一组数据为轴系的角位置,第二组为第一组角位置相应点的误差值。

第一组角度值是从一个周期内取得的 60 个点,即光栅的角度值。单位 (°)

{ 0.0000, 0.0167, 0.0334, 0.0502, 0.0666, 0.0831, 0.0994, 0.1159, 0.1323, 0.1491, 0.1659, 0.1828, 0.1995, 0.2161, 0.2325, 0.2487, 0.2651, 0.2811, 0.2973, 0.3139, 0.3304, 0.3470, 0.3635, 0.3800, 0.3963, 0.4127, 0.4290, 0.4456, 0.4622, 0.4794, 0.4965, 0.5138, 0.5310, 0.5481, 0.5648, 0.5817, 0.5983, 0.6156, 0.6319, 0.6491, 0.6661, 0.6833, 0.7004, 0.7173, 0.7339, 0.7506, 0.7670, 0.7836, 0.8001, 0.8169, 0.8337, 0.8506, 0.8674, 0.8847, 0.9007, 0.9174, 0.9333, 0.9506, 0.9664, 0.9831 }

第二组 (误差值) 感应同步器与光栅所得误差:单位 ( )

{ 6.3, - 1.5, 7.3, - 1.4, 7.8, - 1.7, 7.9, - 2.2, 8.2, - 2.5, 7.6, - 3.1, 6.1, - 5.1, 4.9, - 4.7, 4.1, - 3.8, 5.2, - 3.3, 4.3, - 2.2, 3.0, - 3.2, 4.8, - 5.1, 4.2, - 5.5, 3.7, - 6.3, 3.3, - 6.3, 2.7, - 6.8, 2.1, - 6.3, 1.8, - 6.6, 1.6, - 6.5, 1.7, - 5.6, 2.1, - 4.4, 2.1, - 4.9, 2.1, - 3.2, 2.7, - 5.0, 1.3, - 4.2, 2.2, - 3.4, 1.5, - 3.2, 1.3, - 3.6, 1.8, - 2.9 }

由一周内对应的角度误差值绘出如下图 2 曲线。

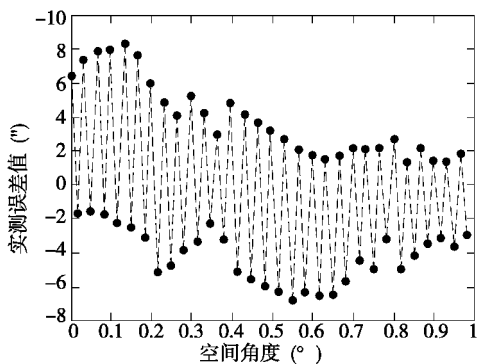


图 2 实际数据误差曲线图

所得数据第一组为横坐标的值,第二组为纵坐标

的值。如图 2 中表示的误差曲线产生的误差范围很大,在进行误差参数运算后将误差曲线进行傅立叶回归变换得:

$$i = y_0 + y_{x1} \sin \frac{360}{n} i + y_{y1} \cos \frac{360}{n} i + y_{x2} \sin \frac{2 \times 360}{n} i + y_{y2} \cos \frac{2 \times 360}{n} i + \dots$$

经计算可得 0 ~ 10 谐波幅值如下表 1 所示。

表 1 各次谐波幅值

(  $y_0 = 42.660963$  )

$i$	$y_{xi}$	$y_{yi}$
1	- 67.288017	44.382520
2	23.422473	- 17.788531
3	- 0.707599	8.275873
4	- 2.596744	- 1.713269
5	1.186650	2.050914
6	2.391912	- 17.064601
7	1.493422	- 0.126379
8	- 0.326546	- 0.183090
9	- 0.222629	- 0.056434
10	- 0.092754	0.111630

从以上分解可以看出,误差中三次以上谐波幅值已很小,主要是低次谐波。由于误差进行参数计算后仍然存在残余误差,所以通过软件补偿数据拟合使运算的值与原误差曲线进行比较,当两条线最大限度的重合时所取得  $N$  的值,才能进行近似完全的补偿。

经计算当  $N$  值取 10 时,理论函数曲线和实际求得的误差曲线相比较后几乎完全重合。其曲线如图 3 所示。

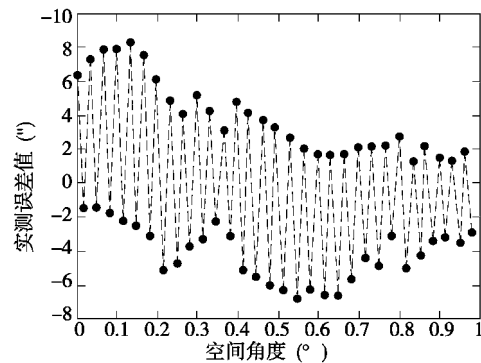


图 3 拟合误差曲线图 (N = 10)

根据图 3 所得的拟合误差曲线再进行误差补偿,补偿后的曲线如图 4 所示。

通过图 4,得到补偿后的误差,可以明显看出补偿前误差范围很大,补偿后的误差值都在零点附近,同补偿前的误差范围相比有很大程度的改变。

补偿前后的最大误差比较为如表 2 所示。

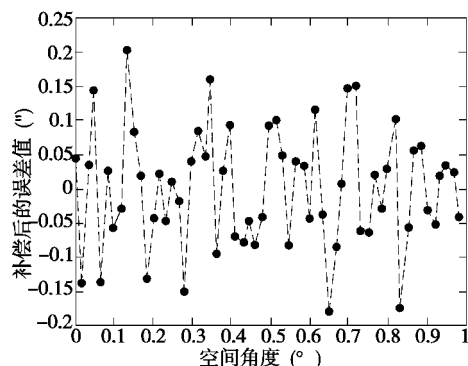


图 4 补偿后的剩余误差曲线

表 2 补偿前后的最大误差值

误差数据个数(一周期)	补偿前最大误差(°)	补偿后最大误差(°)
60	8.2	0.2

由上表可以看出补偿前的最大误差为 8.2,而补偿后的最大误差为 0.2,补偿后误差范围都缩小在 0.2 左右,从此结果我们可以看出,起到了很好的补偿作用。

## 6 结束语

通过设计可以对配套使用的圆感应同步器进行误差补偿,整体提高角度测量系统的测量精度,本文采用的谐波分析法对误差进行傅立叶变换,并对其进行最小二乘法原理的运算找出傅立叶变换的常数项,最后求得误差引起的函数,对此可以对其进行补偿,最终得到满意的修正值。

如何在保留原有优点的同时进一步提高其测量精度是圆感应同步器的追求目标和研究课题。

### [参考文献]

[1] 陆永平. 感应同步器的原理及应用[M]. 北京:国防工业

出版社,1985. [2] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社,2001.

[3] 王茂. 高精度角位置测量系统误差补偿参数调试方法[J]. 仪器仪表学报,2000,21(8):395-398.

[4] 李海斌,等. 数显方位测角仪误差消除与系统实现[J]. 计算机测量与控制,2005,13(12):1403-1405.

[5] 丁华福,曲蔚,曾庆双. 基于轴角转换器的感应同步器测角系统误差分析与补偿[J]. 自动化技术与应用,2002,21(3):29-31.

[6] 任顺清,曾庆双,陈希军. 圆感应同步器测角误差的分离技术[J]. 中国电机工程学报,2001,21(4):92-95.

[7] 殷侠,徐健. 应用圆感应同步器进行高精度角度测量的方法研究[J]. 南通航运职业技术学院学报,2005,4(4):49-50,71.

[8] Peng Donglin, TanWeimin, Liu Xiaokang deng Time-space coordinate transformation and time grating displacement sensor [C]. Proceedings of ISIST '2002,2002,3:440-444.

[9] Du Chun yang, Yang Gui jie Error Analysis and Compensation for Inductosyn based Position Measuring System [J]. IEEE, 2003,0-7803-7883-0/03.

[10] 陈敬泉,尔联洁,等. 基于感应同步器的高速高精度位置测量技术[J]. 北京航空航天大学学报,2005,31(4):447-450.

[11] 孙力,杨贵杰,孙立志. 跟踪鉴幅型感应同步器测角系统误差分析[J]. 电机与控制学报,1999,3(3):181-183.

[12] 伊国兴,马广程,王常虹. 由测角误差引起的速率波动的补偿[J]. 中国电机工程学报,2002,22(11):51-58.

[13] 王先全,甘霖,吴敏,等. 感应同步器的幅值误差和正交误差的检测与补偿[J]. 重庆工学院学报,2009,23(5):69-74. (编辑 赵蓉)

(上接第 48 页)

以上的结果和分析表明,仿真的结果比较满意,可用于指导伺服系统控制。进而可以借助 PLC 中的 PD 功能实现对丝杠的半闭环控制;反馈信号通过编码器的数据线传给 PLC 进而形成环路。借助仿真可以快速地找到比较理想的 PD 控制参数,同时可以在计算机上显示控制效果图,作为现实控制的参考。

## 4 结束语

通过运用非因果关系建模的、可重复利用的和开放的 Modelica 语言对伺服控制系统进行了建模,并在 Dymola 环境中进行仿真,结果能体现伺服系统的各项特性,与分析结果基本上吻合。现有伺服系统模型的建立与仿真研究多数是在 MATLAB/SIMULINK 中进行的,Modelica/Dymola 为伺服系统的研究提供了一种新的方法和思路,进而便于对伺服系统进行深入的研究。Modelica 很好的把机械、电气和控制结合在一起,实现

它们之间的无缝连接。面向对象的建模方式与实际更加贴切,建模相对简单,效率也得到提升,最终还可以用来指导现实中的控制问题的解决。

### [参考文献]

[1] 娄锐. 数控应用关键技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005.

[2] 李炯,张承宁,等. 车辆动力传动模型库的开发与应用[J]. 计算机仿真,2006(23):249-252.

[3] Tiller M. Introduction to Physics Modeling with Modelica [M]. Kluwer Academic Publishers, 2001.

[4] Ferretti G, Magnani G A, Rocco P. Virtual prototyping of mechatronic systems [J]. Annual Reviews in Control, 2004 (28):193-206.

[5] 贺应和. 数控系统伺服电机控制浅探[J]. 应用科学,2008(4):116.

[6] 卢胜利,王睿鹏,等. 显得数控系统——原理、结构与实例[M]. 北京:机械工程出版社,2006. (编辑 赵蓉)