

文章编号 1004-924X(2015)增-0381-07

## 感应同步器读数粗精融合与误差修正

李 婧, 康建兵, 刘雪峰

(北京空间机电研究所, 北京 100076)

**摘要:** 为了提高感应同步器的测角精度, 降低系统噪声和制造工艺对输出角度数据的影响, 本文对实际测角系统中的粗精数据融合和角度误差修正算法进行了研究。针对感应同步器双通道零位偏差导致的数据融合问题, 提出采用纠错表修正粗级的最高位方法处理跳变点; 针对实际测角系统中感应同步器极对数不固定的情况, 介绍了一种利用实测精级数据过零点找粗级起始点并进行四区间判读的方法进行粗精融合。最后, 介绍了分段线性插值的角度误差修正方法。利用现场可编程门阵列完成了提出的算法并进行了实验验证。结果表明: 经过上述融合算法和修正算法, 实际系统感应同步器测角精度可达 $3''$ 以内, 基本满足感应同步器测量时对稳定性、可靠性、精度和抗干扰能力的要求。

**关键词:** 感应同步器; 角度测量; 粗精融合; 误差修正

**中图分类号:** TB922; TP212.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152313.0381

## Data amalgamation of coarse and fine channels and error correction of inductosyn

LI Jing, KANG Jian-bing, LIU Xue-feng

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100076 China)

\* Corresponding author, E-mail: laaawx@163.com

**Abstract:** In order to improve the measurement precision of on inductosyn and to reduce the impact of noise and craft of the system on the output angle data, the paper discusses the data arithmetic and implementation on the amalgamation and correction of the actual system of inductosyn. Based on the problems from zero warp of dual channels of inductosyn, the amalgamation algorithms using correction table for dealing with the leaping dot of coarse data are presented. Then a data amalgamation method is proposed for the actual system to process the variational channel numbers. It confirms the beginning dot using actual measurement data and judges the validity using four quadrants. Finally, the angle error correction method based on the piecewise linear interpolation is discussed as well. A Field Programming Gate Array(FPGA) is used to implement and verify the proposed method. Experimental results indicate that the precision of the system of inductosyn is  $3''$  after using the two methods above. It can satisfy the system requirements for reliability, precision, stabilization, as well as strong anti-jamming.

**Key words:** inductosyn; angle measurement; data amalgamation of coarse and fine channels; error correction

## 1 引言

随着航天技术对天际目标快速、精确跟踪和定位的需要,对角度传感器的测角精度和分辨率提出了更高的要求。作为测角系统的关键元件,角位置传感器的性能直接影响整个测角系统的工作稳定性、转换速度和测量精度等。感应同步器是基于电磁感应原理的高精度角位置传感器,其工作原理与旋转变压器相似,但极对数更多,具有全周期的误差补偿作用,所以元件具有更高的精度<sup>[1][2]</sup>。由于其同时具备了旋转变压器所具有的对安装精度要求相对较低、耐振动和冲击、性能稳定等优点,适合高精度、长寿命的要求<sup>[3]</sup>,因此被广泛应用于高速高精度扫描控制机构中。

在实际感应同步器测角系统中,由于机械安装误差和分辨率所限,粗通道测得的数据最低几位可能不准确,因此需要进行粗精级的数据融合。并且由于系统存在随机噪声和非线性特性,测得的数据与真实的机械角有偏差,还需要进行误差的校正。目前常用的数据融合方法有利用纠错表用精级数据对粗级数据高位进行纠正并合并的算法、有利用滑动区间判定法纠错的算法等,但都仅能解决双通道零位不对齐导致的融合点跳变问题。常用的误差校正方法有最小二乘法、分段常量补偿法、分段线性补偿法等。

本文针对实际测角系统中感应同步器极对数不完全理想的情况,介绍了利用实测精级数据过零点找粗级起始点并进行四区间判读的方法进行粗精融合算法,利用 FPGA 实现并用实测数据进行了验证,融合后的测角数据平滑无跳变点。还对融合后的数据用分段一次线性插值的方法实现了误差校正,校正后实际测角系统感应同步器的测角精度可达  $3''$ ,且实现简单,可靠性高。

## 2 感应同步器的工作原理

感应同步器由定子和转子组成,两部分都由基板、绝缘层和绕组构成,在绕组的外面都包有一层与绕组绝缘的接地屏蔽层<sup>[4-7]</sup>。本文使用绝对式感应同步器由九江精密测试技术研究所研制,其速比为  $1:180$ 。该感应同步器采用内、外双通道结构,外通道绕组结构与一般圆感应同步器相同,内通道则采用螺旋绕组结构。系统的粗精双通道均采用感应同步器单相转子激励,采用两相定子绕组输出的鉴幅工作方式。粗、精级的信号经过前置放大、带通滤波、调幅调相单元后进入闭环轴解算芯片,得到代表数字量的粗、精级数据后需要经过 FPGA 进行粗精数据融合,并且由于工艺、噪声等影响,融合后的数据离实际角度值之间存在误差,还需要利用 FPGA 对误差进行修正<sup>[8-11]</sup>。整个感应同步器的工作原理如图 1 所示:

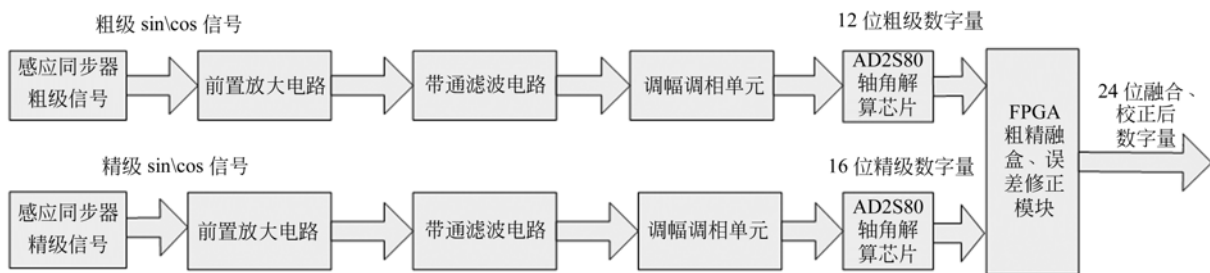


图 1 感应同步器解算框图

Fig. 1 Block diagram of resolving of inductosyn

## 3 粗精通道数据融合与验证

### 3.1 粗精通道数据融合

在粗、精双通道测角系统中,其测量范围和精

度均不相同,由粗通道的测量数据定位精通道的周期位置,精通道的数据则以更高的精度来定位当前的角度位置。这样既能得到较高的测量精度,又能保证大的测量范围,利用双通道的互补性获得高精度的绝对角度信息。

理想情况下认为两通道的零位对齐,对于 180 对极感应同步器来说,粗、精级的跳变应严格按照精级每转过  $180^\circ$ ,粗级转过  $1^\circ$ 。而实际系统中如果双通道零位偏差过大,融合后的绝对角度值就会发生跳跃,跳跃间隔为精通道的测量周期的  $\pm 1$  倍。因此,粗、精数据角组合时必须进行纠错,纠错的原则是以精级数据纠正粗级,并将修正后的粗级的高位与精级合并构成最终的角度测量结果。

具体融合算法步骤如图 2 所示:首先,粗、精级的数据角取相同的位数,若粗级的数字角位数少于精级的数字角位数时,可以在粗级的尾数补

零;然后,把粗级的数字角扩大 180 倍得到 24 位的粗级数字量;再用如下表所示精级数据的高两位 A(精级 1,2 位)与粗级数据的相应位 B(粗级 9,10 位)对比,若 A 为 00 而 B 为 11,则对粗级的相应位(这里为粗级第 1~8 位)进行加‘1’操作,若 A 为 11 而 B 为 00,则对粗级的相应位(这里为粗级第 1~8 位)进行减‘1’操作;最后用校正后的粗级高位数据(这里为粗级第 1~8 位)与精级所有位数据(这里为精级第 1-16 位)合并得到新的融合后的 24 位数字量;然后将该融合后的 24 位数字量除以 180,得到融合后的数字角。



图 2 粗、精组合关系

Fig. 2 Connctcion of amalgamation of coarse and fine channels

### 3.2 仿真实证

利用 FPGA 对 3.1 所述的粗精融合算法进行了实现与仿真,设感应同步器粗级线圈的零位为“0”,而精级线圈的零位为  $x^{\circ}2666$ ,若不进行粗精融合直接取精级的 16 位数据为融合后的低

16 位,取粗级数据乘以 180 之后的 24 位数据中的高 8 位为融合后的高 8 位,融合后的数据会有跳变点,如图 3 的 data\_yuanshi 数据所示,而经过粗精融合算法之后的数据如 comdata 所示,平滑无跳变点,说明了算法 3.1 的有效性。

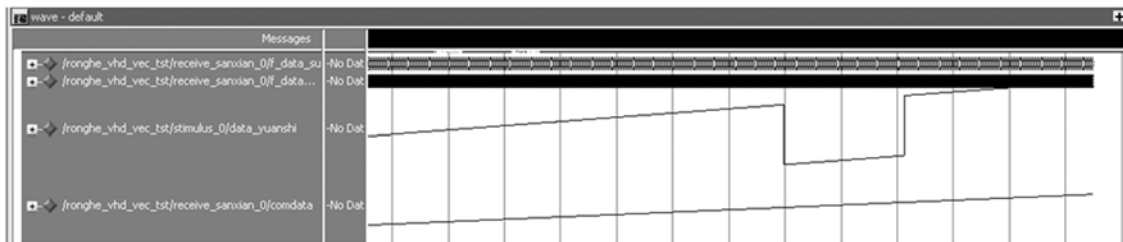


图 3 粗精通道数据融合仿真

Fig. 3 Simulation of amalgamation of coarse and fine channels

### 3.3 实际系统粗精融合算法

在实际的感应同步器测角系统中,粗、精级的数据不仅存在零位不对齐的情况,还存在极对数并不总是 1 : 180 的情况,也就是粗级并不是精确的每转过  $2^\circ$ 精级转过  $360^\circ$ ,有可能在  $2^\circ$ 附近,这样就不能用 3.1 节所述的方法直接对粗级的数据乘以  $180^\circ$ 后与精级数据进行融合了,需要采用下

面的算法进行:

(1)将机构旋转一周,取出精通道每次过零时的粗通道的值,共 180 个点,分别为  $c\_T\_node\_1, c\_T\_node\_2, c\_T\_node\_3, c\_T\_node\_4 \dots$

(2)取粗级有效的 12 位数字量,判断其落入哪个区间,若落入  $[c\_T\_node\_2, c\_T\_node\_3)$ ,则记录  $c0 = c\_T\_node\_1, c1 = c\_T\_node\_2, c2 =$

$c\_T\_node\_3, c3 = c\_T\_node\_4$ , 其余依次类推;

(3) 判断粗级的数据落入哪个象限, 对区间  $[c\_T\_node\_2, c\_T\_node\_3]$  进行四等分, 记录 4 个等分点分别为  $j\_one = c1 + (c2 - c1) / 4$ ,  $j\_half = c1 + (c2 - c1) / 2$ ,  $j\_last = c1 + (c2 - c1) / 4 + (c2 - c1) / 2$ , 假设粗级数据为  $cx$ , 若  $cx < j\_one$ , 则认为粗级数据落入  $[c\_T\_node\_2, c\_T\_node\_3]$  区间的第一象限, 否则若  $cx < j\_half$ , 则认为粗级数据落入第二象限, 否则若  $cx < j\_last$ , 则认为粗级数据落入第三象限, 否则认为粗级数据落入第四象限;

(4) 判断精级有效的 16 位数字量, 判断其落入的区间, 因为精级认为是准确的, 其 4 个等分点分别为  $x"4000"$ ,  $x"8000"$ ,  $x"C000"$ , 假设精级数据为  $f\_reg$ , 若  $f\_reg < x"4000"$ , 认为精级落入第一象限, 否则若  $f\_reg < x"8000"$ , 认为精级落入第二象限, 否则若  $f\_reg < x"C000"$ , 认为精级落入第三象限, 否则认为精级落入第四象限;

(5) 判断粗、精级数据的有效性, 当粗级在第一象限时, 认为精级数据只有在第一, 第二, 第四象限(对应上个粗级所在区间)是有效的。当粗级

在第二象限时, 认为精级数据只有在第一, 第二, 第三象限是有效的。当粗级在第三象限时, 认为精级数据只有在第二, 第三, 第四象限时有效的。当粗级在第四象限时, 认为精级数据只有在第三, 第四, 第一象限(对应下一个粗级所在区间)是有效的;

(6) 对有效的粗、精级数据进行融合, 如粗级落入区间  $[c\_T\_node\_2, c\_T\_node\_3]$ , 将精级的数据按比例转化到区间  $[c\_T\_node\_2, c\_T\_node\_3]$  后进行相加得到融合后的有效数据。若粗级有效位为 12 位, 精级有效位为 16 位,  $j\_period = c2 - c1$  (12 位),  $f\_reg$  为精级 16 位原码, 则得到的 24 位融合后的数据为  $c1 * 256 + j\_period * f\_reg / 16$

### 3.4 粗精融合实验验证

为了验证算法 3.3 的有效性, 对实际的感应同步器(型号为 JGX/360-WND), 极对数为 180 对极。在  $14^\circ$  内进行粗、精级的数据采集, 并记录下精级每次过零时, 粗级对应的点, 为  $c\_T\_node\_1 \dots c\_T\_node\_9 = x"F00", x"F17", x"F2E", x"F45"$ ,

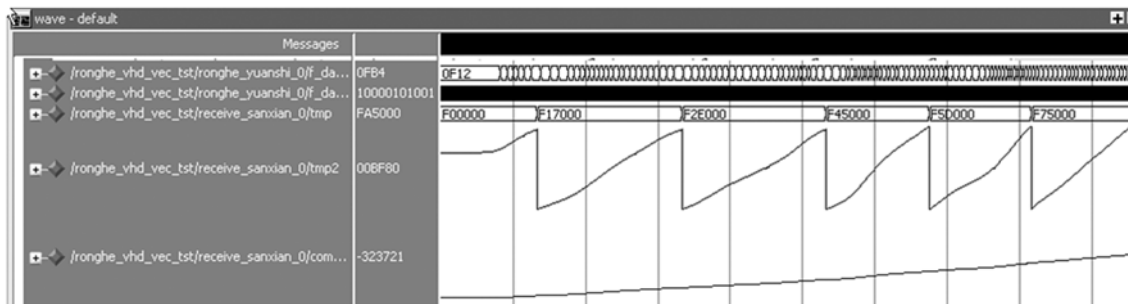


图 4 实际粗精融合算法仿真

Fig. 4 Simulation of actual algorithm of amalgamation

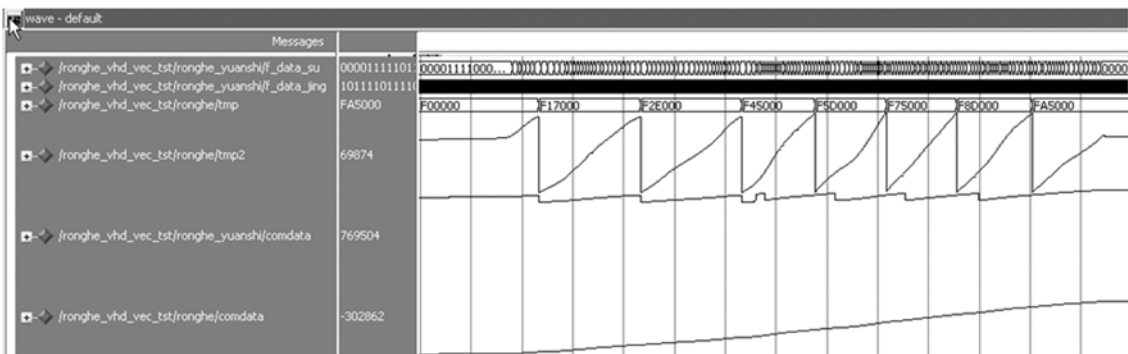


图 5 粗精融合算法对比仿真

Fig. 5 Comparison of simulation of actual algorithm

x”F50”,x”F75”,x”F8D”,x”FA5”,x”FBC”,采集约 300 000 个粗级的数据点,从 x”F12”到 x”FB9”连续变化,以一维数组 cu\_table[1 to 300000]的形式存入 FPGA 中,同时采集约 300000 个精级的数据点,从 x”F101CD”到 x”FB616A”连续变化,以一维数组 jing\_table[1 to 300000]的形式存入 FPGA 中,利用 VHDL 语言编写算法,判断粗、精数据的有效性并以精级数据为准,加上粗级区间的起点,如图 4 所示,组合的数据由 tmp 和 tmp2 相加,tmp 为粗级区间的起点,tmp2 为精级数据。如图 5 所示,如果将实际的数据用 3.1 节的算法进行融合,得到的数据仍然不连续(如 ronghe\_yuanshi/comdata 所示),而用 3.3 节的算法进行融合,得到的数据很连续(如 ronghe/comdata 所示)。

### 4 误差修正算法与实验验证

#### 4.1 误差修正算法

经过粗精融合后的数据虽然连续跳变,但由于机械安装误差、测角电路的误差以及周围环境的影响等因素,测得的角度存在非线性和随机误差,还需要对数据进行误差修正使其更接近真实值。误差修正采用分段线性插值的算法:

(1)在感应同步器全周期内(以  $-7 \sim -7^\circ$  为例),利用标准源为基准每 15' 记录一个感应同步器的粗、精融合后的读数  $angle\_24b(k)$  ( $k=1..54$ ) (24 位),并取其高 16 位  $an\_h\_16b(k)$  ( $k=1..54$ ) (16 位)。理论值为  $lilun(k)$  ( $k=1..54$ );

(2)每 15' 计算感应同步器读数的变化量  $\Delta x_i = an\_h\_16b(x_{i+1}) - an\_h\_16b(x_i)$

(3)每 15' 计算感应同步器读数的误差量  $y_i = angle\_24b(k) - lilun(k)$

(4)每 15' 计算感应同步器读数的误差变化量  $\Delta y_i = y_i(k+1) - y_i(k)$

(5)每 15' 计算斜率  $k\_slope = \Delta y_i / \Delta x_i$

(6)每 15' 里面按照一次线性插值的方法进行误差修正,  $y\_24b = k\_slope(x_n - x_{n0}) + y_i$ ,其中  $x_n$  为第  $n$  个区间内实际测量得到的角度数据,  $x_{n0}$  为第  $n$  区间的起始点的测量值。

(7)误差修正后的角度为  $y_b = x_n - y\_24b$

#### 4.2 误差修正实验验证

为了验证算法 4.1 的有效性,对实际的感应同步器(型号为 JGX/360-WND)在  $14^\circ$  内进行了每 15' 一次的数据标定。记录每 15' 对应的实测角度  $angle\_24b$ (共 54 个数),取其高 16 位得到  $xi$  (h16b)(共 54 个数),计算每 15' 对应的实测角度与真实角度的误差量  $yi$ (24b)(共 54 个数),计算每 15' 区间内误差量的斜率  $ki\_en = (yi + 1 - yi) / (xi + 1 - xi)$ ,具体数据如表 1 所示。利用 FPGA 完成 4.1 节所示算法。修正前每 15' 实测的角度误差如图 6 所示,修正后每 30' 进行一次角度验证,得到的误差曲线如图 7 所示。

表 1 误差修正实测数据  
Tab.1 Data of actual correction

xi(h16b)	Yi(23b)	$\Delta x$	$\Delta y$	ki_en
61715.82422	0	45.86718	45.57778	0.99369
61761.69141	45.57778	45.41015	-12.92222	-0.28456
61807.10156	32.65556	45.51953	1.07777	0.02367
61852.62109	33.73333	46.13932	80.41111	1.74279
61899.76042	114.14444	46.61458	141.24444	3.03004
.....	.....	.....	.....	.....

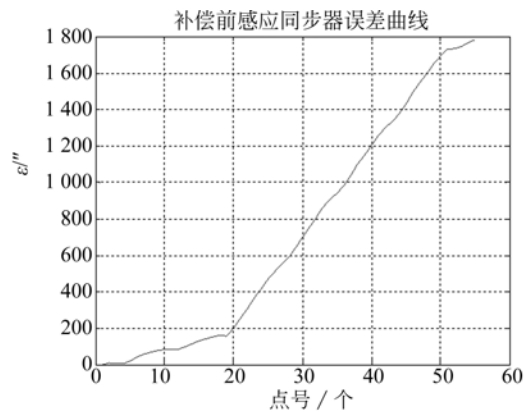


图 6 未修正前感应同步器误差曲线

Fig.6 Error Curve of no correction of inductosyn

对比图 6 和图 7,进行了角度误差修正之后,感应同步器的角度与实际角度的误差基本可以做到 3"以内。

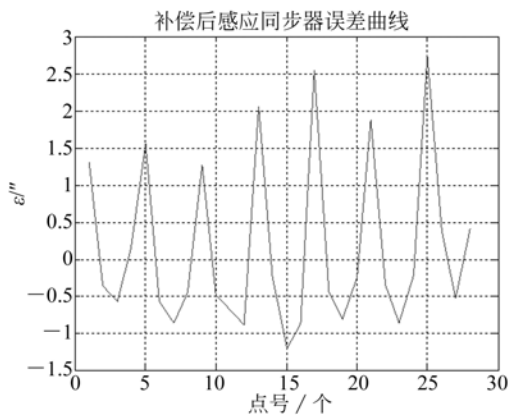


图 7 修正后感应同步器误差曲线

Fig. 7 Error Curve of correction of inductosyn

## 5 结 论

本文针对感应同步器测角系统中由于随机噪声、非线性因素以及制造工艺等导致的测角误差问题,从数据融合和误差修正两个方面进行了算法研究、仿真和实验验证。针对 180 对极感应同步器来说,理想的粗精融合原理认为粗级每转过  $2^\circ$ ,精级转过  $360^\circ$ 。为了解决粗、精级线圈零位不

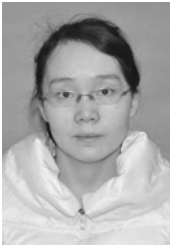
对齐的情况,可以将粗通道的数字量扩大 180 倍之后,利用纠错原则和纠错表对粗级的相应位进行加‘1’、减‘1’的操作。经过纠错处理后,用精级的数字角取代粗级数字角度的相应位,组合的数据除以 180,即得到感应同步器的组合输出角度。实际的感应同步器精级每转过  $360^\circ$ ,粗级不一定转过精确的  $2^\circ$ ,有可能为  $1.8^\circ, 1.9^\circ, 2.1^\circ \dots$ 。因此不能用结论(1)的方法进行。需要用实际角度的标定。记录每次精级过零(或  $360^\circ$ )时,粗级对应的数字量  $\varphi_i (i = 1 \dots N)$ ,并以  $\varphi_i$  为基准,将精级的数据对应到粗级的相应区间内,再判断粗、精数字量有效的前提下进行融合,该方法应用在实际的感应同步器测角系统中测试,已证明其简单有效。粗精融合后由于存在非线性和随机误差,还需要根据实际角度数据(自准直仪或数显表)进行误差修正使其解算的角度更接近于真实值。由于感应同步器角度具有很高的重复性,可以采用每  $15'$  采集一次真实角度,在  $15'$  区间内进行一次线性插值的误差修正法,该方法运用在实际测角系统中,可以看到误差由原来的  $0.5^\circ$  减小为  $3''$  以内。

## 参考文献:

- [1] 侯新宇,金龙旭. 感应同步器测角系统的实现[J]. 光学精密工程, 2012, 12(22): 92-95.  
HOU X Y, JIN L X. Implementation of an angle measuring system of inductive inductosyn[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 12(22): 92-95. (in Chinese)
- [2] 何佳宁,刘强. 高精度圆感应同步器角度测量系统[J]. 电子测试, 2008, 10(10): 1-3.  
HE J N, LIU Q. High precision angular measuring system of round inductosyn[J]. *Electronic Test*, 2008, 10(10): 1-3. (in Chinese)
- [3] 王先全,甘霖. 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(自然科学), 2009, 5(23): 69-72.  
WANG X Q, GAN L. Detection and compensation of amplitude error and quadrature error for inductosyn [J]. *Journal of Chongqing Institute of Technology(Natural Science)*, 2009, 5(23): 69-72. (in Chinese)
- [4] 刘承军,齐明. 感应同步器测角系统误差建模[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 9(41): 51-54.  
LIU CH J, QI M. Error modeling of inductosyn angle measuring system [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2009, 9(41): 51-54. (in Chinese)
- [5] LI CH, GAO R X. Error compensation techniques for a linear inductosyn displacement measurement system[C]. *Proceedings of Integrating Intelligent Instrumentation and Control*. Boston: IEEE, 2015: 364-369.
- [6] WU Y A. On-orbit calibration of inductosyn error [C]. *Proceedings of the American Control Conference*. Baltimore: IEEE, 2014: 2887-2891.
- [7] LIU Q. Application of inductosyns in high precision mechanical servo systems[C]. *Proceedings of 1ST IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. Singapore: IEEE, 2006: 1-4.
- [8] DENG H Y, WANG X L. Application of the discrete wavelet transform to fault detection of angular measuring system of a precision servo turntable [C]. *Proceedings of the 2003 5<sup>th</sup> IEEE Interna-*

- tional Conference on Power Electronics and Drive Systems, Singapore; IEEE, 2003:287-291.*
- [9] WU Y A. Calibration of inductosyn cyclic error [C]. *Proceedings of the Third IEEE Conference on Control Application, Glasgow; IEEE, 2014: 187-192.*
- [10] DU CH Y, YANG G J. Error analysis and compensation for inductosyn based position measuring system[C]. *Conference Record of the 2003 IEEE Industry Applications Conference, Salt Lake City; IEEE, 2013 :6-10.*
- [11] BUNTE A, BEINEKE S. High-performance speed measurement by suppression of systematic resolver and encoder errors[C]. *IEEE Transactions on Industrial Electronisc, 2014,51(1):49-53.*

#### 作者简介:



李 婧(1984—),女,山东肥城人,硕士,工程师,2010年于四川大学获硕士学位,现在北京空间机电研究所从事精密机构控制方向。Email: laaawx@163.com