

两相非等节距时栅传感器的谐波修正

王先全¹, 吴敏², 朱革¹, 冯济琴¹

1. 重庆理工大学 电子学院, 重庆 400050, 2. 重庆理工大学 车辆学院, 重庆 400050

摘要: 采用误差修正是提高两相非等节距时栅位移传感器精度的有效方法. 首先, 详细研究了两相非等节距时栅传感器的原理和误差组成, 分析了长周期误差、短周期误差等误差特性. 其次, 提出了一种新型的谐波误差修正方法, 它可以同时消除长周期误差和短周期误差, 且不要求等间距采样, 采样点数少, 数据处理简单. 最后, 通过实验表明, 该方法能大大提高传感器的精度.

关键词: 传感器; 时栅; 电磁感应; 极对数; 谐波修正

中图分类号: TH701

文献标识码: A

感应同步器、旋转变压器、自整角机、时栅传感器等位移传感器, 都是电磁感应型传感器, 正弦信号激励, 输出信号也是正弦信号, 只是相位延迟^[1-4], 即:

激励信号:

$$U_d = \sin(\omega t) \quad (1)$$

感应信号:

$$U_s = \sin(\omega t + \theta) \quad (2)$$

通过鉴别激励信号和感应信号的相位差 θ , 即可检测空间角度.

一般地, 有两种方法提高这类传感器的精度^[5-7]: 增加传感器的极对数和修正传感器误差. 前者受制造工艺和传感器的体积限制, 不可能大幅度提高极对数; 后者可以用硬件和软件处理, 是提高精度很有效的方法.

这类传感器包含以 360° 为周期的长周期误差和以对极角度为周期的多次谐波短周期误差^[8-9], 一般长周期误差比较小. 对这类传感器的误差修正的方法也很多. 有的忽略长周期误差, 只修正短周期误差; 有的长周期误差和短周期误差都修正, 但修正长周期误差后, 需要对短周期误差重新排序; 有的在 360° 范围内采集很多点, 然后进行傅里叶变换;^[10-11]. 这些方法中, 有的修正误差不彻底, 有的误差修正繁琐, 有的测试工作量大.

本文研究了两相非等节距位移传感器的信号模型, 与自整角机和时栅传感器相比, 它的极对数要多得多. 然后, 对其误差进行分析, 研究了一种误差修正方法新方法, 它能同时对长周期误差和短周期误差进行修正, 且采样点少, 不需要等间距采样, 数据处理简单.

1 两相非节距时栅位移传感器的原理

图 1 是非等节距位移传感器的结构示意图, 传感器由转子和定子组成, 定子和转子分别均匀开槽, 但

收稿日期: 2009 - 09 - 28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50575235); 重庆市自然科学基金资助项目(2008BB2336); 重庆市教委资助项目(KJ090609).

作者简介: 王先全(1968 -), 男, 四川华蓥人, 副教授, 主要从事信号检测与处理, 计算机软件等研究.

定子的槽距是转子槽距的 1.5 倍. 其中定子上的正、余弦绕组交替绕制, 转子上的连续绕组沿各槽绕制, 由于定子槽距与转子槽距不相等, 所以又称为非等节距位移传感器.

图 2 是传感器绕组展开图及磁场分布示意图. 在连续绕组上施加正弦信号 $\sin t$, 由于电磁感应, 在沿转子圆周上分布正弦磁场. 正、余弦绕组在电磁场的作用下, 产生感应信号. 其绕组 S_+ 、 S_- 、 C_+ 、 C_- 的感应信号为:

$$\begin{cases} U_{S_+} = U_m \sin t \cos \\ U_{S_-} = U_m \sin t \cos(t + 540^\circ) = - U_m \sin t \cos \\ U_{C_+} = U_m \sin t \cos(t + 270^\circ) = - U_m \sin t \sin \\ U_{C_-} = U_m \sin t \cos(t + 810^\circ) = U_m \sin t \sin \end{cases} \quad (3)$$

将余弦绕组的信号在时间上延迟 90 并叠加, 得:

$$\begin{aligned} U &= 2U_m (\sin t \cos + \sin(t + 90^\circ) \sin) \\ &= 2U_m \sin(t +) \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)与式(2)是一致的, 它们信号特征是一致的. 但是两相非等节距位移传感器的极对数是连续绕组的极对数的 1/2. 若最大刻线槽为 384 槽, 两相非等节距位移传感器、自整角机、时栅传感器极对数分别为 192, 64, 64. 在不增加刻线密度的情况下, 增加传感器的极对数, 有利于提高传感器的测量精度.

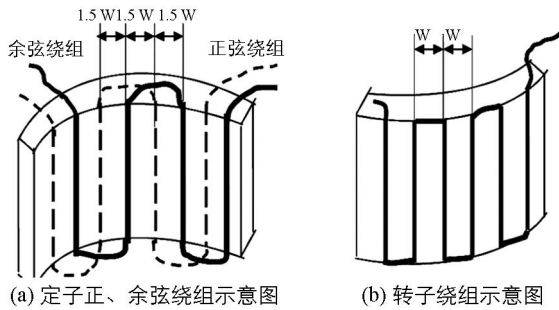


图 1 新型时栅传感器结构示意图

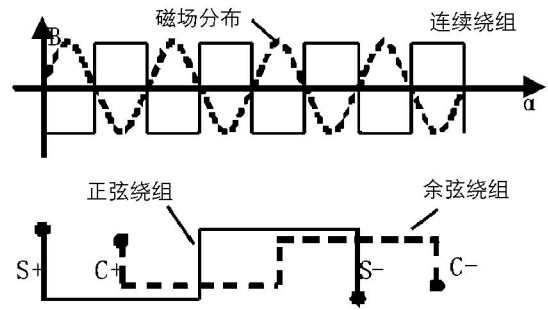


图 2 传感器绕组展开及磁场分布示意图

2 传感器误差的组成

传感器的误差由三部分组成: 长周期误差、短周期误差和测试零点误差. 其中长周期误差是传感器的定子和转子不同心引起的误差, 它是以 360 为周期的误差; 短周期误差是由传感器的定子和转子的绕线槽加工误差和绕线误差及理论误差, 它是对极内误差, 以对极角度为周期; 测试零点误差是测试零点和标准零点没有对齐, 是一个固定误差.

2.1 长周期一次误差

长周期一次误差是以 360 为周期的谐波误差, 由于传感器的定子和转子安装偏心及其安装相对倾斜, 以及轴本身的刚度低, 致使轴系几何轴线微小弯曲将产生转子和定子的偏心及相对倾斜, 都将带来传感器 360 为周期的一次谐波误差 i_1 :

$$i_1 = i_1 \cos((i) + \phi_1) \quad (5)$$

式中: $i = 0, 1, 2, \dots, N - 1, N$; N 是传感器一周测试的点数; (i) 为第 i 个位置测量的角度; i_1 为整周误差的幅值; ϕ_1 为整周误差的相位.

2.2 短周期多次谐波误差

由于 传感器的定子和转子的绕线槽和绕线的误差, 正、余弦绕组的放大倍数不相等, 正、余弦绕组不正交, 以及正、余弦绕组的互感, 都将会出现短周期误差, 它是对极角度为周期的基波或多次谐波.

$$2i = \sum_{k=1}^K (k \cos(kp(i) + \varphi_k)) \quad (6)$$

式中: $k=1, 2 \dots K$, 谐波次数; p 为传感器的极对数; k 为对应 k 次谐波下的误差的幅值; φ_k 为对应 k 次谐波下的误差的相位.

2.3 传感器的综合误差

由于测试零点不一定能与标准零点对齐, 误差还包含有直流分量, 即综合各项误差为:

$$i = 0 + 1i + 2i = 0 + 1 \cos(i) + \sum_{k=1}^K (k \cos(kp(i) + \varphi_k)) \quad (7)$$

求出(7)式的 0 、 1 、 1 、 k 、 φ_k 就可以得出误差规律, 通过误差补偿, 就可以消除误差, 提高传感器的精度.

3 误差谐波修正的新方法

3.1 传感器误差的线性化处理

从(7)式可以看出, 它包含误差的幅值和相位, 是非线性的, 不能直接进行拟合, 需要进行线性化处理.

由(7)式可以得出:

$$i = 0 + 1i + 1i = 0 + 1_x \cos(i) + 1_y \sin(i) + \sum_{k=1}^K (k_x \cos kp(i) + k_y \sin kp(i)) \quad (8)$$

其中: 1_x 、 1_y 为长周期误差在 x 轴和 y 轴的分量; k_x 、 k_y 为第 k 次短周期谐波误差在 x 轴和 y 轴的分量.

在(7)式中, 0 、 1_x 、 1_y 、 k_x 、 k_y 是未知数, i 、 $\cos(i)$ 、 $\sin(i)$ 、 $\cos kp(i)$ 、 $\sin kp(i)$ 、... 是已知数. 我们引入残余误差概念, 并把(8)写成矩阵的形式.

$$V = L - AX \quad (9)$$

其中: $V = [v_1 \ v_2 \ \dots \ v_n]^T$, 残余误差向量; $L = [1 \ 2 \ \dots \ n]^T$, 误差向量;

$A(i, :) = [1 \ \cos(i) \ \sin(i) \ \cos p(i) \ \sin p(i) \ \cos 2p(i) \ \sin 2p(i) \ \dots \ \cos Kp(i) \ \sin Kp(i)]$ 表示第 i 次测量的系数矩阵;

$X = [0 \ 1_x \ 1_y \ 1_x \ 1_y \ 2_x \ 2_y \ \dots \ k_x \ k_y]^T$, 未知数矩阵.

应用最小二乘法, 使 $V^T V$ 为最小, 则各未知数的估计值为:

$$X = (A^T A)^{-1} A^T L \quad (10)$$

3.2 误差谐波修正的新方法

谐波修正一般有以下几种方法:

1) 只消除短周期误差. 该方法比较简单, 只在极角内等间距采样若干点, 然后用误差拟合法或傅里叶变换找出误差规律, 进行拟合. 该方法比较简单, 能有效地消除短周期误差, 缺点是不能消除长周期误差.

2) 整周采集大量点误差, 消除长周期误差和短周期误差. 该方法在每一个对极内采样相同数量的点数, 并采用等间距采样, 可以有效地消除长周期误差和短周期误差. 但需要检测很多点, 需要耗费大量时间. 这里设传感器的对极数为 192, 一对极内采样 48 点, 那么需要采样 $192 \times 48 = 9216$ 点.

3) 整周采集少量点误差, 消除长周期误差和短周期误差. 该方法在整周采集少量点信息, 先消除长周期误差. 对消除长周期误差后的各点残余误差重新排序, 然后消除短周期误差. 这种方法其实就是采用傅里叶变换, 求解长周期误差和短周期误差, 优点是测量的点数较少, 缺点是数据处理麻烦, 且要求等间距采样. 因为傅里叶变换要求等间距.

这里研究一种新的方法, 只在整周采样少量点, 不要求等间距采样, 一次性求解长周期误差和短周期误差.

两相非等节距位移传感器的误差有两个特点:

- 1) 长周期一次误差以 360 为周期;
- 2) 短周期多次谐波误差以对极角度为周期. 这也就是说短周期多次谐波误差在各对极内是一致的.

如果能寻找一种测试方法, 对长周期误差而言, 各采样位置是均布在圆周上; 对短周期而言, 各点采样位置也是均布在对极内, 那么, 就可以分离出长周期误差和短周期误差. 下面以 192 对极传感器为例, 整周采样 29 点, 分别列出各点对应的长周期位置和短周期位置, 如表 1 所示.

表 1 长周期检测位置及对应短周期位置表

| | | | | | | | | | | |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 长周期位置/° | 12.413 8 | 24.827 6 | 37.241 4 | 49.655 2 | 62.069 0 | 74.482 8 | 111.724 1 | 124.137 9 | 136.551 7 | 148.965 5 |
| 短周期位置/° | 1.163 8 | 0.452 6 | 1.616 4 | 0.905 2 | 0.194 0 | 1.357 8 | 0.646 6 | 1.810 3 | 1.099 1 | 0.387 9 |
| 序号 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 长周期位置/° | 86.896 6 | 99.310 3 | 161.379 3 | 173.793 1 | 186.206 9 | 198.620 7 | 211.034 5 | 223.448 3 | 235.862 1 | 248.275 9 |
| 短周期位置/° | 1.551 7 | 0.840 5 | 0.129 3 | 1.293 1 | 0.581 9 | 1.745 7 | 1.034 5 | 0.323 3 | 1.487 1 | 0.775 9 |
| 序号 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | |
| 长周期位置/° | 260.689 7 | 273.103 4 | 285.517 2 | 297.931 0 | 310.344 8 | 322.758 6 | 335.172 4 | 347.586 2 | 360.000 0 | |
| 短周期位置/° | 0.064 7 | 1.228 4 | 0.517 2 | 1.681 0 | 0.969 8 | 0.258 6 | 1.422 4 | 0.711 2 | 0 | |

如果按对极内角度大小排序, 则对应对极内角度为 0, 0.064 7, 0.129 3, 0.194 0, 0.258 6, 0.323 3, 0.387 9, 0.452 6, 0.517 2, 0.581 9, 0.646 6, 0.711 2, 0.775 9, 0.840 5, 0.905 2, 0.969 8, 1.034 5, 1.099 1, 1.163 8, 1.228 4, 1.293 1, 1.357 8, 1.422 4, 1.487 1, 1.551 7, 1.616 4, 1.681 0, 1.745 7, 1.810 3. 可见, 对极内的角度也是均与分布的.

按照表 1 位置点采样, 可以看出: 在整周上是均应分布的, 对用对极内的各点也是均与分布的.

按表 1 的位置, 按(9)可以计算出各项参数. 而(9)式是不要求等间距采样的. 所以采样点的位置只要大致与表 1 的数据一致即可.

4 实验与测试

用光栅来作为角度检测标准, 光栅是海德汉公司生产, 精度为 0.5. 传感器的实验装置如图 3 所示, 在转台的中心轴上分别联接传感器和光栅, 当转台转动时, 带动光栅和传感器同时转动. 分别读出光栅和传感器的角度, 其差值就是传感器的误差.

按照表 2 的位置测出各点的角度误差, 其误差值如图 4 和表 2.

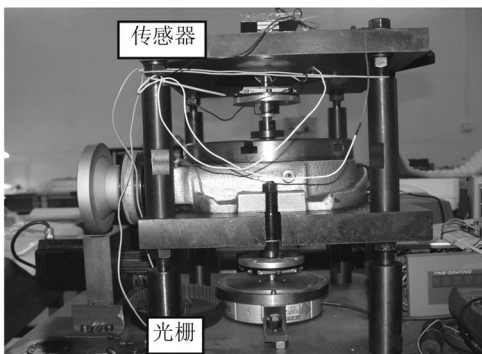


图 3 误差检测系统装置图

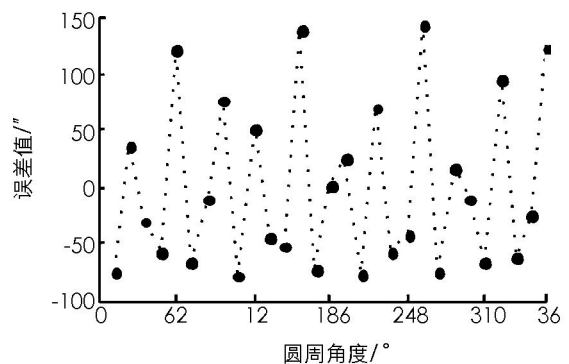


图 4 各测量位置点的原始误差值图

表 2 检测位置及误差

| | | | | | | | | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 位置/° | 12.41 | 37.24 | 37.24 | 49.65 | 62.06 | 74.48 | 86.90 | 99.31 | 111.72 | 124.14 |
| 误差/s | -75.0 | 38.0 | -29.5 | -57.0 | 121.5 | -66.5 | -10.0 | 76.5 | -78.5 | 5.5 |
| 位置/° | 136.55 | 148.97 | 161.38 | 173.79 | 186.21 | 198.62 | 211.03 | 223.45 | 235.86 | 248.28 |
| 误差/s | -45.5 | -51.5 | 140.0 | -72.5 | 0.5 | 25.0 | -75.5 | 69.5 | -57.0 | -42.0 |
| 位置/° | 260.69 | 273.10 | 285.52 | 297.93 | 310.34 | 322.76 | 335.17 | 347.59 | 360.00 | |
| 误差/s | 243.5 | -75.0 | 18.0 | -14.5 | -65.5 | 94.5 | -61.5 | -25.5 | 123.0 | |

把表 2 的数据带入式(10), 求出各项修正参数, 如表 3.

从表 2 和表 3 可以看出, 修正前的误差为 $-75.5 \sim 243.5$, 经修正后的误差为 ± 0.6 .

表 3 各项修正系数表

| 项目 | 直流分量 | 一次 | 192 次 | 2 × 192 次 | 3 × 192 次 | 4 × 192 次 | 5 × 192 次 | 6 × 192 次 | 误差值 |
|--------|---------|---------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| sin 系数 | 0.479 9 | 1.024 0 | 56.075 1 | 19.947 6 | 10.954 9 | 4.961 2 | 2.9171 | 0.998 0 | ± 0.6 |
| cos 系数 | | 1.949 2 | 77.853 2 | 21.134 3 | 11.932 3 | 6.072 2 | 2.104 0 | 1.596 4 | |

根据表 3 的修正参数, 用软件进行修正, 修正后的传感器重新测试, 测试数据如图 5 所示. 从图中可以看出, 经修正后的精度为 ± 0.8 . 大大提高了传感器的精度.

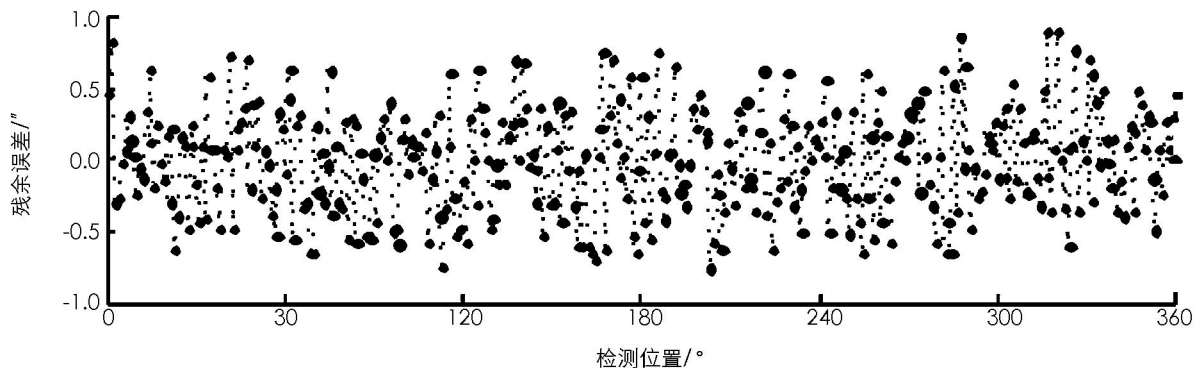


图 5 误差修正后残余误差图

5 结 论

两相非等节距时栅位移传感器, 定子节距是转子节距的 1.5 倍, 定子、转子上的节距分别相等, 这样定子、转子都是等间距, 加工简单, 刻线精度高. 采用电动机绕线方式, 连续绕组在转子绕线槽等间距绕线, 定子、转子绕组交替绕线, 其绕线方便. 这种结构, 巧妙构造正弦、余弦感应信号以转子绕组 2 倍节距为周期, 通过对正弦、余弦感应信号移相、叠加, 形成与激励信号同频率的行波. 通过鉴相电路, 实现角位移的检测.

两相非等节距时栅位移传感器的误差有长周期误差和短周期误差组成. 长周期一次谐波误差以 360 为周期, 短周期误差以对极角度为周期的多次谐波误差. 对极内误差在各对极内是一致的.

谐波误差修正新方法只需在 360 内采样少量的位置点, 可以一次性分离出长周期误差和短周期多次谐波误差, 且不需要对各采样点排序, 也不需要等间距采样.

谐波误差修正新方法中的采样方法既能满足 360 内均布采样, 也能满足对极内等效均布采样.

经谐波误差修正后, 传感器的误差从 $-75.5 \sim 243.5$ 降到 ± 0.8 , 可见大大提高了传感器的精度.

参考文献:

- [1] 彭东林, 张兴红, 刘小康, 等. 场式时栅位移传感器研究 [J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(3): 329 - 331.
- [2] 彭东林, 刘小康, 张兴红, 等. 时栅位移传感器的研究 [J]. 重庆工学院学报, 2006, 20(5): 1 - 4.

- [3] 李 谋. 位置检测与数显技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [4] 李发海. 电机学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [5] 彭东林. 混激型时栅位移传感器研究 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(2): 113 - 115.
- [6] 彭东林, 刘小康, 张兴红, 等. 精密时栅位移传感器的研究 [J]. 制造技术与机床, 2005, 11: 98 - 101.
- [7] Peng Donglin, Tan Weimin, Liu Xiaokang, et al. Time-Space Coordinate Transformation and Time Grating Displacement Sensor [C] // Proceedings of ISIST, 2002, 3: 440 - 444.
- [8] 彭东林, 刘小康, 张兴红, 等. 基于谐波修正法的高精度时栅位移传感器 [J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(1): 31 - 33.
- [9] 李海斌, 蔡 伟, 李国英, 等. 圆感应同步器方位测角系统误差的产生与消除 [J]. 传感器技术, 2005, 24(6): 17 - 22.
- [10] 任顺清, 曾庆双, 陈希军, 等. 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.
- [11] 郭 新, 冯汝鹏, 张建立, 等. 轴角数字转换器在感应同步器测角系统中的应用及误差分析 [J]. 高技术通讯, 2001, 4: 70 - 73.

Harmonic Wave Correcting Method of Two-Phase Unequal-Pitch Time-Grating Displacement Sensor

WANG Xian-quan¹, WU Min², ZHU Ge¹, FEN Gg Ji-qin¹

1. School of Electronic Information and Automation, Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400050, China;

2. Chongqing Institute of Automobile, Chongqing Institute of Technology, Chongqing 400050, China

Abstract: Error correction is an effective way to improve the accuracy of two-phase unequal-pitch time-grating displacement sensors. This paper introduces the principle of the two-phase unequal-pitch time-grating displacement sensor and the composition of its errors and analyzes the features of long-period errors and short-period errors. Based on such analyses, a new harmonic error correcting method is proposed, which can simultaneously eliminate long-period errors and short-period errors and does not require equidistant sampling. Compared with the traditional harmonic error correcting methods, this method is characterized by few sample points and simple data processing. Applied in an experiment, this method was shown to be able to enhance the accuracy of the sensor greatly.

Key words: sensor; time-grating; electromagnetic induction; number of pole-pairs; harmonic correction

责任编辑 汤振金