

# 平面时栅传感器多读数头构建方法与误差修正

王先全,文成杨,徐粮,方怡,周锡祥,李浩

重庆理工大学;时栅传感器及先进检测技术重庆重点实验室

**摘要:** 基于平面时栅传感器原理提出了多读数头平面时栅传感器。利用耦合面积原理分析传感器正方形与正弦形状定子槽形状与激励耦合的谐波特性,对比不同耦合形状对各次谐波的削弱效果,选择最优的耦合形状构建传感器模型。设计了传感器信号处理模型,对感应信号进行解算得到测量角度。设计了对误差补偿模型测量结果进行修正,提高了传感器的测量精度,通过与原始数据的比较误差补偿后,测量精度显著提高。

**关键词:** 平面时栅传感器;多读数头;耦合面积;信号处理;误差补偿

中图分类号: TG87;TH712

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2019.10.021

## Construction Method and Error Correction of Multi-reader Head of Planar Time-grating Sensor

Wang Xianquan, Wen Chengyang, Xu Liang, Fang Yi, Zhou Xixiang, Li Hao

**Abstract:** Based on the principle of planar time grating sensor, a planar time grating sensor with multi-reading head is proposed. The harmonic characteristics of the coupling between square and sinusoidal stator slot shape and excitation are analyzed based on the principle of coupling area. The effects of different coupling shapes on harmonic attenuation are compared, and the optimal coupling shape is selected to construct the sensor model. The sensor signal processing model is designed, and the measurement angle is obtained by calculating the induction signal. The measurement accuracy of the error compensation model. The measurement accuracy is improved significantly by comparing the error compensation with the original data.

**Keywords:** planar time grating sensor; multi-reading head; coupling area; signal processing; error compensation

### 1 引言

平面时栅传感器是一种以时间测量空间的传感器<sup>[1]</sup>。根据时栅的测量原理<sup>[2-4]</sup>,平面时栅位移传

感存在驻波信号不相等的二次谐波误差、时间相位不交引起的基频和二次谐波误差、驻波信号引入的 $n$ 次高频干扰谐波误差<sup>[5]</sup>。多读数头平面时栅位移传感器利用读数头的高一致性对平面时栅的误差进行辨识<sup>[6]</sup>,对误差进行消除以提高测量精度是传感器研究重点。喻洪麟等<sup>[7]</sup>设计了一个激励

基金项目: 重庆市研究生科研创新项目(CYS17277)  
收稿日期: 2019年3月

(3) 切削试验验证了仿真的正确性: 颗粒塑性越大,碰撞耗能越强;在颗粒填充参数与切削条件一定的情况下,填充铝青铜粉的镗刀具有更好的减振效果,镗刀在一阶固有频率下的功率谱密度值为2.464,相比于填充铁粉时降低了30.88%。

### 参考文献

- [1] Egger P, Caracoglia L, Kollegger J. Modeling and experimental validation of a multiple-mass-particle impact damper for controlling stay-cable oscillations[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2016, 23(6): 960-978.
- [2] Gnanasambandham C, Eberhard P. Predicting the influence of an added liquid in a particle damper using coupled SPH and discrete element method[J]. *PAMM*, 2017, 17(1): 32.
- [3] 李健, 高微, 张亚双, 等. 颗粒振动及耗能特性研究的弹性接触建模方法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(8): 1211-1216.
- [4] 陶玉勇, 胡深, 杨啟梁, 等. 颗粒阻尼双层隔振系统减振特性试验研究[J]. *现代制造工程*, 2018(9): 1-5.
- [5] 肖望强, 许展豪, 边贺川. 基于颗粒阻尼技术的数控机床轻量化研究[J]. *航空制造技术*, 2018, 61(11): 40-47.
- [6] 鲁正, 王贤林, 何任飞, 等. 一种组合型质量阻尼器的振动台试验研究[J]. *振动与冲击*, 2018, 37(12): 220-225.
- [7] 张恒明, 庞学慧, 杨立煜, 等. 颗粒阻尼铣刀主要填充参数对切削性能影响的正交试验分析[J]. *工具技术*, 2017, 51(2): 30-33.

作者: 张恒明, 助教, 陕西国防工业职业技术学院数控工程学院, 710300 西安市

Author: Zhang Hengming, Assistant, Numerical Control Engineering Department, Shaanxi Institute of Technology, Xi'an 710300, China

线圈和每组 4 个线圈组成线圈组,通过线圈转动切割磁性小球拾取信号方式的读数头;邹自强<sup>[8]</sup>提出利用 5 个读数头系统消除谐波误差;张文颖等<sup>[9]</sup>提出奇读数头与偶读数头相结合的混合布局方式消除谐波误差;苏东风等<sup>[10]</sup>提出通过布置多个读数头均布的方式消除谐波误差。

上述方式都是基于布置多个读数头,虽然一定程度上消除了谐波误差,但增加了安装难度。在读数头加工过程中,随着读数头的增加,制造误差越大。孙闯等<sup>[11]</sup>利用组合补偿得方式对谐波误差进行修正。对于平面传感器来说,以上降低谐波误差的方式依然不能满足目前对精度越来越高的要求,需要不断提高传感器精度。

针对以上问题,本文利用耦合面积原理分析了矩形和正弦形定子槽与转子耦合面积的谐波规律,对读数头的结构进行优化,其次通过处理读数头输出信号及误差补偿,进一步对误差进行修正,以提高多读数头平面时栅传感器的测量精度。

## 2 多读数头平面时栅传感器的原理和结构

### 2.1 平面时栅传感器

平面时栅传感器通过激励极片与感应极片的重合面积变化来实现对空间分布电场强度进行调制并拾取信号。图 1 为平面时栅传感器结构,由矩形的激励极片和两个半正弦形结合的感应极片组成,感应极片与激励极片宽相等为  $M$ ,感应极片高为  $H$ ,相邻感应极片间存在间隔。相邻两个激励极片上施加反向的正弦激励,在激励极片移动过程中与感应极片产生感应信号。

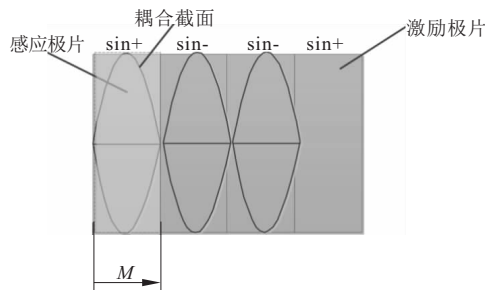


图 1 平面时栅传感器结构

平面时栅传感器通过激励极片与感应极片的重合面积变化来实现对感应信号的拾取,以其重合的面积来表示信号的幅值。当激励极片相对于感应极片移动距离为  $x$ ,利用感应极片的正弦形通过积分公式,求得重合面积表达式为

$$S = \int_x^{W+x} H \sin \frac{\pi x}{W} dx = 2H \frac{W}{\pi} \cos \frac{\pi x}{W} \quad (1)$$

### 2.2 多读数头平面时栅传感器的原理与结构

电容式传感器是一种非光学的位移传感器,通过对电容周期变化的记录来实现位移测量的电容式传感器<sup>[12]</sup>。以九对极的多读数头平面时栅传感器为例,读数头由可以转动的转子和定子组成,通过在转子和定子上开槽绕线的方式得到激励线圈与感应线圈。转子上形成 18 个激励面,定子上形成 16 个感应面,由激励面与感应面之比为 9 : 8 故感应面在结构上间隔  $\pi/8$ ,槽角距为  $9\pi/8$ ,其结构展开示意图如图 2 所示。

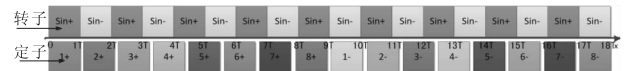


图 2 多读数头平面时栅传感器展开

在激励截面上施加  $U_e = U_i \sin \omega t$  的激励信号时,得到对面感应面的感应信号为

$$E_i = U_i U \sin \omega t \quad (2)$$

式中,  $U_i$  为定子感应信号电压;  $i$  为感应面序号。

正弦感应为

$$U_{is} = -K \sin(\alpha + (i - 1)\pi/8) \quad (3)$$

余弦感应为

$$U_{ic} = K \cos[\alpha + (i - 1)\pi/8] \quad (4)$$

由定子槽角距为  $9\pi/8$ ,联合式(3)和式(4)得到绕组感应表达式为

$$U_i = U_m \cos[\alpha + (i - 1)9\pi/8] \quad (5)$$

式中,  $U_m$  为感应系数;  $U_i$  为感应电势幅值。

将式(5)代入式(2),得到感应电势表达式为

$$E_i = U_m \cos[\alpha + (i - 1)9\pi/8] U \sin \omega t \quad (6)$$

读数头转子以相隔  $180^\circ$  的绕线方式形成绕组,感应绕组为正弦与余弦的两项感应,推导得出正弦和余弦感应信号表达式。

正弦方向为

$$E_s = E_5 - E_{13} + E_7 - E_{15} \quad (7)$$

余弦方向为

$$E_c = E_1 - E_9 + E_3 - E_{11} \quad (8)$$

根据耦合面积原理,得到第  $i$  个耦合截面的耦合面积  $f_i(x)$ ,则推导出耦合面积的读数头表达式。

正弦方向为

$$f_s = f_5 - f_{13} + f_7 - f_{15} \quad (9)$$

余弦方向为

$$f_c = f_1 - f_9 + f_3 - f_{11} \quad (10)$$

### 3 读数头的优化设计与特征

在读数头的定子与转子上的激励与感应面可形成不同形状,通过对不同面积耦合形状的分析,得到最优读数头感应截面形状。利用 MATLAB 软件分别对矩形与正弦形的耦合面积进行仿真,得到其谐波误差特性,对比不同形状的谐波误差含有率,选择最优耦合面积形状作为定子槽形状。

#### 3.1 矩形耦合特征

根据多读数头平面时栅传感器的原理,当感应面为矩形时,转子在  $x$  方向上移动,与  $x$  轴下方的矩形定子截面进行耦合。设转子转动周期为  $2T$ ,推导出第一个截面的耦合面积表达式为

$$f_1 + (x) = T^2 - 2Tx \quad (0 < x < T) \quad (11)$$

$$f_1 + (x) = -T^2 + 2(x - T)T \quad (T < x < 2T) \quad (12)$$

利用 MATLAB 软件对读数头数学模型表达式进行仿真,假设  $T = 8$ ,在一个周期内取 160 个点,得到读数头的谐波成分数据,如表 1 所示。

表 1 谐波含有率

次数两相	基波	3 次谐波	5 次谐波	7 次谐波	9 次谐波	11 次谐波	THD (%)
sin 相	1.000	0.0461	0.0166	0.0205	0.0125	0.0035	5.47
cos 相	1.0000	0.0461	0.0166	0.0205	0.0125	0.0035	5.47

由表 1 可知,在矩形耦合形状中,存在基波与 3 次、5 次、7 次、9 次和 11 次谐波畸变率为 5.47%。

#### 3.2 正弦耦合特点

正弦形耦合是将转子截面设为半正弦形截面,定子为矩形截面,其余与矩形相同(见图 3)。对比条件相同,转子长宽为  $T$ ,利用多读数头原理与耦合面积原理,推导正弦形耦合面积的变化数学模型。

根据正弦面积公式,推导得出正弦耦合面积变化公式为

$$f_{1+} = (2T^2/\pi) \cos[(\pi/T)x] \quad (0 < x < 2T) \quad (13)$$

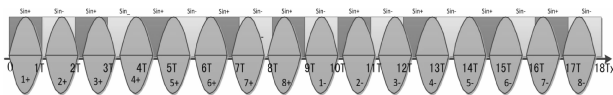


图 3 正弦耦合

利用 MATLAB 软件将推导模型进行仿真,在  $x$  的区间范围内取 160 个点,假设  $T = 8$ ,其谐波成分见表 2。

表 2 各次谐波含有率

次数两相	基波	3 次谐波	5 次谐波	7 次谐波	9 次谐波	11 次谐波	THD (%)
sin 相	1.0000	0	0	0	0	0	0
cos 相	1.0000	0	0	0	0	0	0

如表 2 所示,相较于矩形耦合面积,正弦形耦合面积仅含有基波,有效降低了空间不交角引起的二次谐波与高频干扰引起的高次谐波。通过对比可知,正弦耦合截面更有效地降低了各次谐波误差,提高了多读数头平面时栅传感器的精度。

### 4 实验与仿真分析

#### 4.1 信号处理

根据多读数头的特性对读数头的信号进行处理。处理原理见图 4,传感器感应信号经过滤波放大电路被放大,并消除了信号中的直流分量。利用 A/D 采样电路对信号进行 A/D 转换,得到  $U'_s$  与  $U'_c$ ,经过幅值检测降低赋值误差得到  $A_s$  和  $A_c$ 。对激励信号进行相位检测,将  $A_s$  和  $A_c$  与激励信号相位检测的结果进行数字相敏检波后,利用锁相跟踪检测角度,解算出测量角度  $\phi$ 。

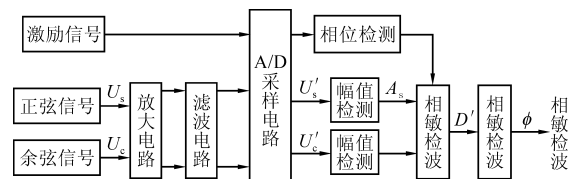


图 4 信号处理过程

#### 4.2 误差补偿

经过信号处理得到的测量角度为原始角度,在实际读数头的测量过程中,还存在由感应信号延迟造成的延迟误差、读数头制造过程中造成的正交误差(由制造商提供)、放大滤波电路造成的延迟误差,为了消除以上误差,对测量结果进行误差补偿,补偿方法如图 5 所示。

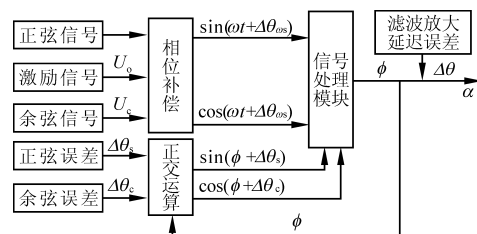


图 5 误差补偿过程

利用激励信号对正余弦感应信号进行相位补偿,得到正弦信号  $\sin(\omega t + \Delta\theta_{os})$ 、余弦信号  $\sin(\omega t + \Delta\theta_{oc})$ ,其中  $\Delta\theta_{os}$  与  $\Delta\theta_{oc}$  为正弦与余弦感应信号相位延迟。将得到的补偿信号与信号处理模块进行一定的运算,实现对感应信号延迟误差的补偿。滤波放大的延迟误差通过对测量结果加  $\Delta\theta$  实现补偿,正交误差补偿利用制造商提供的正交误差  $\Delta\theta_s$  与  $\Delta\theta_c$  与信号处理模块得到的结果  $\phi$  进行正交运

算,得到  $\sin(\phi + \Delta\theta_c)$  与  $\cos(\phi + \Delta\theta_c)$ ,加入信号处理模块进行数学运算实现对正交误差的补偿,最终得到测量结果为  $\phi + \alpha$ 。

### 4.3 仿真过程

采用九对极多读数头对传感器进行建模,并通过 ansoft 对模型仿真得到感应信号,经过信号处理求解得到仿真角度。设激励信号  $10V * \sin(2 * \pi * 400 * \text{time})$ ,仿真 40 个电角度,每步进  $1^\circ$  输入阻抗大小为  $10\Omega$ ,输出阻抗的大小为  $1M\Omega$ ,仿真时长 10ms,取 256 个点。将求解得到的仿真角度与实际机械角度进行对比,得到原始误差(见图 6a),信号经过误差补偿模型后的误差见图 6b。

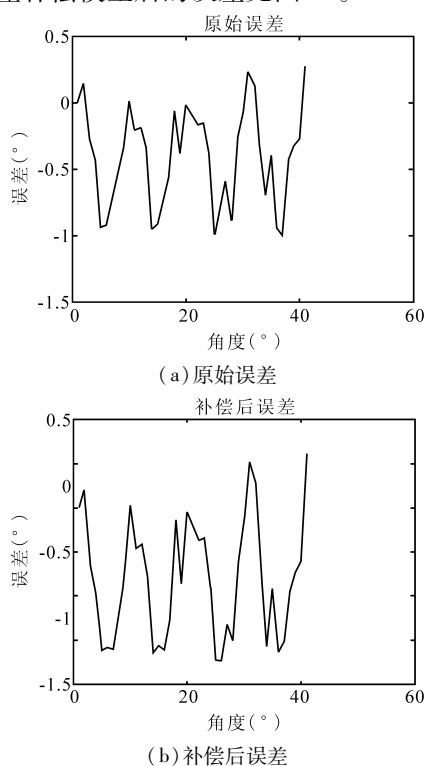


图6 补偿前后误差对比

## 5 结语

通过对平面时栅传感器原理的研究,研究了多读数头平面时栅传感器激励与感应截面的形状、信号处理方式与传感器的误差补偿。通过 MATLAB 软件对矩形与正弦形耦合截面进行仿真,对比各耦合形状的谐波特性,说明正弦耦合截面对谐波的削弱最有效,降低了传感器的高次谐波误差,并构建了基于感应面为正弦的多读数头平面时栅传感器模型。

利用 ansoft 对模型进行仿真,得到传感器的原始误差为  $0^\circ \sim 0.8^\circ$ ,分析传感器的误差来源,对其进行误差补偿与修正,得到补偿后的误差值为  $0^\circ \sim 0.06^\circ$ ,精度提高 10 倍,对传感器的误差进行了有效的修正,提高了测量精度。为了实现更高精度的测量,还需对传感器的误差修正进行深入研究。

### 参考文献

- [1] 张天恒,彭东林,杨继森,等. 直线式时栅传感器的动态测量与数据处理[J]. 传感器与微系统,2011,30(11): 83-85.
- [2] 高中华,陈锡侯,杨继森,等. 直线时栅传感器全误差模型与误差修正方法研究[J]. 传感器与微系统,2012(2): 87-89,93.
- [3] 昌驰,朱革,付敏,等. 基于广场耦合的时栅位移传感器设计[J]. 传感器与微系统,2016(2):113-115,119.
- [4] Kim M, Moon W. A new linear encoder-like capacitive displacement sensor[J]. Measurement, 2006, 39(6): 481-489.
- [5] 张瀚潇,郑方燕,吴玉梅,等. 纳米时栅位移传感器误差模型建立与分析[J]. 仪器技术与传感器,2018(4):1-5.
- [6] 王先全,余尧,朱桂林,等. 等差相位构建的多读数头位移传感器研究[J]. 仪器技术与传感器,2016(9):1-4.
- [7] 喻洪麟,李蓉,何安国,等. 环形阵列扭转传感器读数头测量原理分析[J]. 重庆大学学报,2010,33(8):64-68.
- [8] 皱自强. 论圆光栅的高精度质量莫尔条纹信号的研究[J]. 光学精密工程,1983(2):39-48.
- [9] 张文颖,劳达宝,周维虎,等. 多读数头混合布局测角误差抑制方法[J]. 光学精密工程,2017,25(9):2339-2346.
- [10] 苏东风,续志军,贾继强,等. 提高圆光栅测角系统的读数头设计[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(7):653-657.
- [11] 孙闯,任顺清,王舰. 高精度测角系统得检定与补偿方法[J]. 检测与控制,2017,30(4):100-104.
- [12] 彭凯,于治成,刘小康,等. 单排差动结构的新型纳米时栅位移传感器[J]. 仪器仪表学报,2017,38(3):734-740.

第一作者:王先全,教授,重庆理工大学,时栅传感器及先进检测技术重庆重点实验室,400054 重庆市

First Author: Wang Xianquan, Professor, Chongqing University of Technology, Chongqing Key Laboratory of Time Gate Sensors and Current Detection Technology, Chongqing 400054, China