

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312108

单相激励电容式时栅角位移传感器研究^{*}

高忠华^{1,2,3}, 胡 帅¹, 汪 强¹, 付 敏², 冯济琴²

(1. 重庆理工大学机械工程学院 重庆 400054; 2. 重庆理工大学机械检测技术与装备教育部工程研究中心 重庆 400054;
3. 重庆理工大学时栅传感及先进检测技术重庆市重点实验室 重庆 400054)

摘 要:针对现有多相激励时栅角位移传感器在小体积时无法设置更多极对数进一步提升稳定性,导致精度和动态性能指标无法得到提升等问题,提出一种单相激励电容式时栅角位移测量方法。该方法采用单相激励耦合成四路空间正交的驻波信号,通过电路实现行波构造,从而实现角位移测量。文中介绍了多相激励时栅传感器存在的问题、单相激励时栅的测量原理,完成了传感器样机的研制,并通过实验验证该原理的有效性。实验结果表明,相同尺寸和相同电极数量情况下,单相激励传感器的精度和动态性能指标优于多相激励传感器,单相激励传感器精度为 $\pm 20''$,稳定性为 $10''$,400 rpm 转速下速度波动为 $\pm 1.25\%$,跟随误差为 $\pm 2.5''$,满足直驱电机的使用要求。

关键词: 电容式时栅;单相激励;多相激励;角位移传感器;行波构造

中图分类号: TH712 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Study on capacitive type time-grating angular position sensor with single-phase excitation

Gao Zhonghua^{1,2,3}, Hu Shuai¹, Wang Qiang¹, Fu Min², Feng Jiqin²

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China;

2. Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China; 3. Chongqing Key Laboratory of Time grating Sensing and Advanced Detection Technology, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Because of these shortcomings of the existing time-grating angular position sensor with multi-phase excitation, such as the accuracy, stability and dynamic performance improved difficulty in a small volume because of the difficulty of arranging further pole pairs, an angular position measurement method for capacitive type time-grating with single-phase excitation is proposed. In this method, the single-phase excitation is used to couple into four orthogonal signals in the space field, which can be constructed travelling-wave in time and space field simultaneously by a circuit. Then, an angular position measurement can be realized. In this article, these shortcomings of time-grating with multi-phase excitation, the measurement principle of time-grating with single-phase excitation, and the sensor prototype are introduced. The effectiveness of this measurement principle is evaluated by experiments. Experimental results show that the accuracy and dynamic performance of single-phase excitation sensors are better than multiphase excitation sensors with the same size and the same number of electrodes. the prototype accuracy of $\pm 20''$ and stability of $10''$ were obtained. Speed fluctuation of $\pm 1.25\%$ and the following error is $\pm 2.5''$ under 400 rpm can meet the requirements of direct-drive motors.

Keywords: capacitive type time-grating; single-phase excitation; multi-phase excitation; angular position sensor; traveling-wave construction

收稿日期: 2023-11-02 Received Date: 2023-11-02

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(52375526)、重庆市教委重大项目(KJZD-M202201103)、重庆市自然科学基金项目(cstc2021jcyj-msxmX0512)资助

0 引言

角位移测量作为工业生产中的关键测量参数,被称为“精密制造之眼”,随着国家装备制造业发展水平不断提升,不但对角位移传感器精度和分辨力指标要求越来越高,而且对尺寸的要求也越来越小^[1]。时栅角位移传感器作为新型的传感器,近些年开始在工业制造中广泛地被使用,但随着大批量的应用也暴露出其动态测量(跟随误差、速度稳定性)和高速测量等性能不足的问题^[2]。

为了利用多对极的细分和均化作用达到高精度、高分辨力的测量,角位移传感器普遍采用多相激励的方法来实现,典型的代表是时栅角位移传感器,田青青等人提出一种基于双相激励平面时变磁场式时栅角位移传感器,整周原始误差达到了 $\pm 80''$ ^[3]。杨继森等^[4]为了解决时变磁场分布不对称和因外部原因导致的匀速运动坐标系的不稳定等原因,先后提出采用三相激励并使用三次样条插值对误差进行补偿,后来又提出采用双相激励增加感应线圈磁场强度来补偿磁场分布不均,使短周期测量误差低至 $33.4''$ ^[5]。刘小康等^[6]提出一种电场式时栅,采用四相激励两级单排式结构,同时对信号进行二次调制的方法来提高传感器的精度,使传感器精度达到 $\pm 8''$ 。彭凯等^[7]采用四相激励的电场式时栅,并利用自适应卡尔曼滤波的方式来抑制角位移传感器的动态误差,将动态误差降低了约70%。

其他的角位移传感器如旋转变压器、感应同步器等也采用多相激励的方法来提高精度、稳定性和抗干扰性^[8-9]。颜亚灵等^[10]使用双相激励的双通道旋转变压器并利用RD26进行解码设计,使得旋转变压器误差更小,角位置波动更小,解码精度达到了 $\pm 2''$ 。李太平等^[11]研发的感应同步器采用三相激励,并重新对励磁和信号调理模块进行了优化,同时融入了粗精通道的数据,有效提高系统测角重复精度达到 $0.44''$ 。

由于单相激励使用的电路简单,具有设计灵活,结构紧凑等优点,使用单相激励能够使测量结果具有较好的一致性^[12-14]。光学测量通常采用单相激励的方法,文献^[15]中提到一种单场扫描的光栅,获得了更高的分辨力。光栅采用单光场,利用多个测量头消除安装偏心误差,但对测量头安装要求严格,安装精度直接影响光栅的测量精度,因此任曦等^[16]提出了对光栅多测量头安装误差补偿方案,使测量误差达到 $0.8''$ 。张文颖等^[17]提出一种新型的立体光栅解决多测量头安装问题,测量精度达到 $4.33''$ 。付敏等^[18-19]在研究光场式时栅时提出一种单光场余弦透光面单相激励形式,并在此基础上不断完善,使光场式时栅角位移传感器的测量精度达到 $\pm 5''$ 。由于

光学测量的光源制造和极板加工难度大,所以测量头数目不能过多。

本文提出一种利用电容极板面积变化来构造时栅行波的方法,采用单相激励时空调制的方式,在小尺寸的情况下,可以布置更多极对数来提升信号的分辨力和稳定性,消除多相激励带来的正交性和幅值不一致等因素对精度的影响,有效提升时栅动态测量和高速测量的性能,适应更多领域的使用要求。开展了单相激励电容式时栅传感器的研究。

1 多相激励时栅传感器存在问题分析

1.1 极对数受限,难以提升细分和均化效应

项目组前期采用四相激励的时栅角位移传感器在已应用于工业生产中,传感器由定子传感片和转子传感片组成,如图1(a)所示。

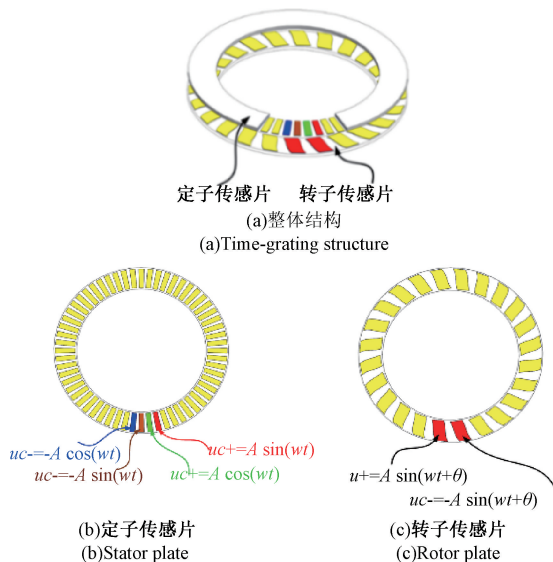


图1 多相激励时栅传感器

Fig. 1 Multi-phase excitation time-grating sensor

定子传感片采用扇环形电极作为激励电极,整周均匀分布。相邻4个极片构成一组对极,并且通入相位依次相差 $\pi/2$ 的正弦激励信号,如图1(b)所示。转子传感片上的每两个感应极片对应激励极片一个对极,构成差分结构,如图1(c)所示。

在规定尺寸下,传感片面积有限,多相激励占用了较大的面积,如图1(b)的四相激励极片所示。为了保证信号强度,不能通过减小单个极片的宽度来增加极对数。从图1(b)中可以看出,极对数仅为激励电极数的1/4,极对数量少,意味着细分和均化能力差。传感器表现为信号稳定性差,分辨力降低,直接影响动态下的速度稳定性,尤其是在小尺寸的传感器上表现更为明

显。为了提高分辨率和速度稳定性,不得不采用软件数字滤波提高数据的稳定性,然而数字滤波会带来时间上的延迟,影响动态跟随误差,特别是在高速测量下,几乎无法使用。

1.2 相位、幅值不对称影响精度

采用多相激励,要尽量保证各相信号幅值相等、两相之间的相位正交,使电气误差降到最低。电气误差的影响见图2所示。

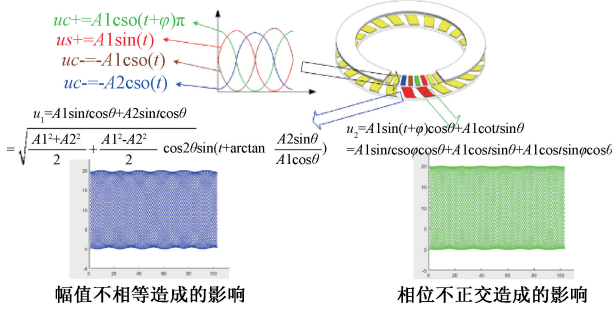


图2 相位、幅值对行波信号的影响

Fig. 2 Effect of phase and amplitude on traveling wave signal

理想情况下,通入四相幅值相等、相位正交的激励信号,经转子极片感应的信号叠加后可获得理想时栅的行波信号 $u_0 = A \sin(\omega t + \theta)$ 。若幅值不等,行波信号中会叠加一次和二次的电气误差,如图2中 u_1 所示。若相位不正交,行波信号中会叠加二次的电气误差,如图2中 u_2 所示。无论哪种误差都会叠加到传感器的角度值中,最终影响时栅传感器的测量精度。

为了简化电路结构和减少电气误差,光场式时栅研究时使用了单相激励和单个测量头,通过控制光源的精度和安装精度来保证测量精度,而本文所介绍的单相激励电容式时栅,可以使用更多极对数和更多测量头提高分辨率,与光场式时栅的研究有明显的区别。

本文开展的单相激励电容式时栅传感器的研究。克服了上述多相激励时栅在小尺寸情况下难以提高分辨率和速度稳定性,以及多相激励相位、幅值不对称对精度影响。

2 单相激励传感器测量原理

本文研究的单相激励时栅传感器,定、转子极片数量采用非整数比,图3(a)为单相激励时栅传感器,定、转子极片非整数比对应关系如图3(b)所示。

其中定子传感片上的每个极片对应1个对极,所有极片串联构成多个对极,极对数是4相激励传感器的4倍,转子每4个极片对应定子的5个极片,极片数量比为4:5。

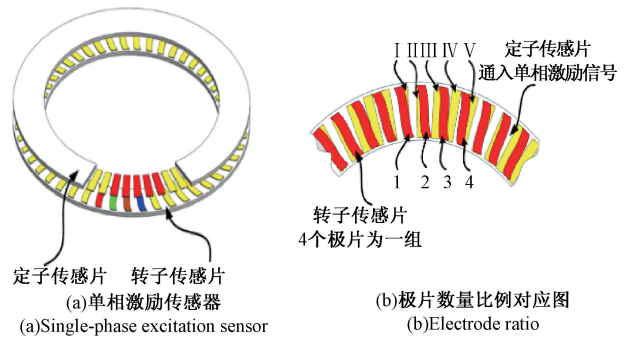


图3 定、转子极片非整数比对应关系

Fig. 3 Relationship of nonintegral ratio of electrode between stator and rotor

当转子传感片从初始位置开始转动一定的角位移时,利用定、转子极片正对电容面积的变化行角度调制。定、转子极片相对面积变化关系如图4所示。

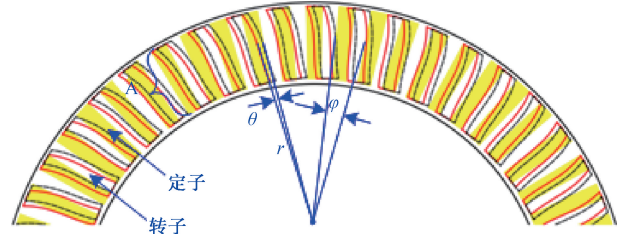


图4 定、转子极片相对面积变化对应关系

Fig. 4 Relationship of relative area change between stator and rotor electrode

转子传感片的感应极片耦合合成四路不同的驻波信号,转子上的每个极片与定子极片的正对面积变化关系表达式如式(1)所示。

$$S_1 = \int_0^{\varphi-\theta} \int_{p_2}^{p_1} r dr d\theta = \frac{2A}{N} (1 + \cos N\theta)$$

$$S_2 = \int_0^{\frac{\varphi}{2}-\theta} \int_{p_2}^{p_1} r dr d\theta = \frac{2A}{N} (1 - \sin N\theta)$$

$$S_3 = \int_0^{\theta} \int_{p_2}^{p_1} r dr d\theta = \frac{2A}{N} (1 - \cos N\theta)$$

$$S_4 = \int_0^{\frac{\varphi}{2}+\theta} \int_{p_2}^{p_1} r dr d\theta = \frac{2A}{N} (1 + \sin N\theta)$$

(1)

式中: $p_1 = \sqrt{r^2 + 2A \sin(N\theta)}$, $p_2 = \sqrt{r^2 - 2A \sin(N\theta)}$, p_1, p_2 为转子轮廓线与位移之间的极坐标表达式, A 为图案的长度, r 为图案中心距离圆心的距离, N 为极对数, θ 的取值范围为 $[0, \varphi]$, φ 为两个定子传感片极片之间的距离。

定子传感片上通入单相激励信号 $u = u_m \sin(\omega t)$, 则转子传感片上的每个极片耦合出1路驻波信号,一组极片耦合出的4路空间正交的驻波表达式如式(2)所示。

由式(2)可以看出, u_1 、 u_2 、 u_3 、 u_4 仅为空间正交的 4 路驻波信号, 分别将 u_1 和 u_3 、 u_2 和 u_4 相减, 并对 u_2 和 u_4 的差值进行移相, 得到时栅所需时间和空间均正交的两路标准驻波信号, 时间和空间正交的标准驻波信号表达式如式(3)所示。

$$\begin{aligned} u_1 &= u_m \times S_1 = \frac{2Au_m}{N}[\sin(\omega t) + \sin(\omega t)\cos N\theta] \\ u_2 &= u_m \times S_2 = \frac{2Au_m}{N}[\sin(\omega t) - \sin(\omega t)\sin N\theta] \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} u_3 &= u_m \times S_3 = \frac{2Au_m}{N}[\sin(\omega t) - \sin(\omega t)\cos N\theta] \\ u_4 &= u_m \times S_4 = \frac{2Au_m}{N}[\sin(\omega t) + \sin(\omega t)\sin N\theta] \\ u_{13} &= u_1 - u_3 = \frac{4Au_m}{N}[\sin(\omega t)\cos N\theta] \\ u_{24} &= u_2 - u_4 = -\frac{4Au_m}{N}[\cos(\omega t)\sin N\theta] \end{aligned} \tag{3}$$

将式(3)中的两路信号叠加, 得到单相激励的时栅行波信号表达式如式(4)所示。

$$u = \frac{4Au_m}{N}[\sin(\omega t + N\theta)] \tag{4}$$

3 单相激励传感器设计与实现

3.1 单相激励传感片电极设计

单相激励传感器由定子传感片和转子传感片组成, 如图 5 所示。

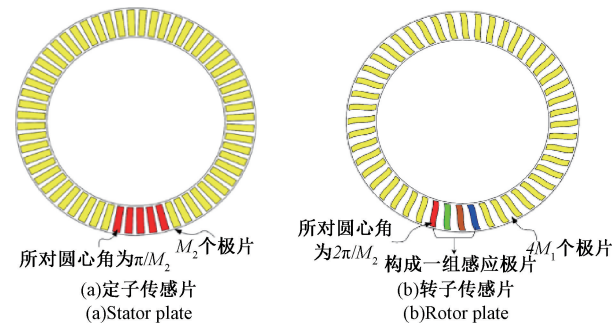


图 5 单相激励传感器

Fig. 5 Single-phase excitation sensor

定子传感片的激励电极由 M_2 个径向高度相同、圆心角为 π/M_2 的扇环形极片沿周向等间隔排成一圈组成, 所有极片连成一组, 通入单相激励电信号 $u = u_m \sin(\omega t)$, 极对数为 M_2 个, 如图 5(a) 所示。转子传感片的感应电极是由 M_1 组极片组成, 每组 4 个极片, 共 $4M_1$ 个极片沿周向等间隔排列而成的, 形成一个完整的

圆, 如图 5(b) 所示。感应极片的数量与激励极片的数量之比满足 $4M_1:M_2=4:5$, 本文设计的单相激励传感器参数如表 1 所示。

表 1 单相激励传感器参数

Table 1 Parameters of single-phase excitation sensor

传感器参数	定子传感片	转子传感片
外圆直径/mm	60	60
中空孔直径/mm	28.9	28.9
极片数/个	60	48
极对数/个	60	60

传感片直径尺寸相同情况下, 单相激励与四相激励传感器参数对比如表 2 所示。

表 2 单相激励与四相激励传感器参数对比

Table 2 Comparison of parameters between single-phase excitation and multi-phase excitation sensors

传感器参数	单相激励	四相激励
外圆直径/mm	60	60
中空孔直径/mm	28.9	28.9
定子极片数/个	60	60
极对数/个	60	15

由表 2 可以看出, 相同尺寸下, 单相激励极对数为四相激励的 4 倍。

3.2 单相激励传感器行波构造方法

由式(2)得到式(4)的行波信号, 是由电路实现的, 行波构造电路如图 6 所示。

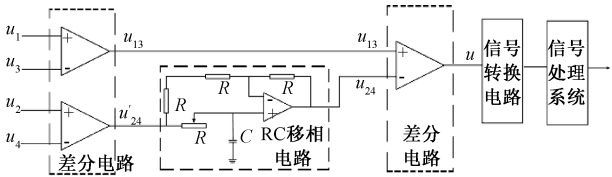


图 6 行波构造电路

Fig. 6 Traveling-wave construction circuit

根据图 6 的行波构造电路, 将式(2)的 4 路驻波信号中空间相差 180° 的信号经过差分电路处理, 得到两路简化的驻波信号 u_{13} 和 u'_{24} , 把 u'_{24} 经移相后得到式(3)的两路时间和空间正交的驻波信号 u_{13} 和 u_{24} , 再经过差分电路得到式(4)的时栅行波信号 u , 经过整形电路转换成数字信号送入 FPGA 中进行信号处理, 按时栅原理实现角度解算, 从加载激励信号到构造行波信号的过程波形如图 7 所示。

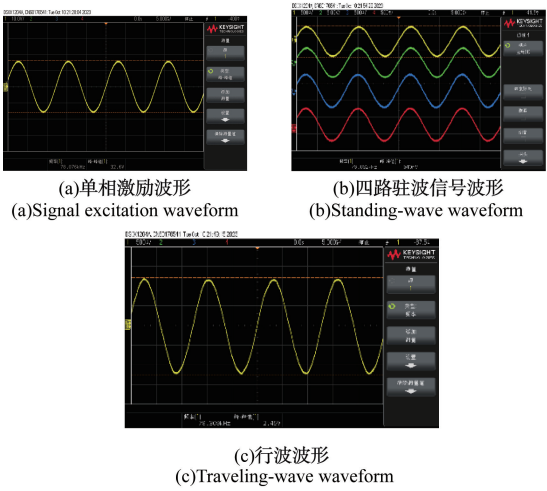


图7 行波构造过程波形

Fig. 7 Traveling-wave structure waveform

3.3 单相激励传感器制作

转子传感片和定子传感片采用 PCB 加工工艺,通过敷铜实现极片的制作。主板电路采用高云公司的 FPGA 作为主控芯片,从产生激励信号到感应信号的处理以及角度解算,全部通过 FPGA 完成,通过 BISS-C 协议输出角度值,单相激励的传感器实物如图 8 所示。

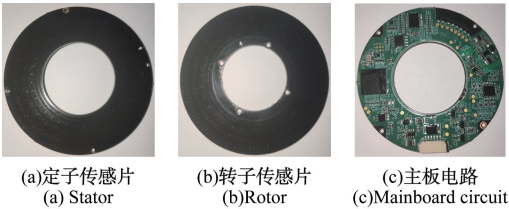


图8 单相激励传感器

Fig. 8 Single-phase excitation sensor

4 实验与数据分析

4.1 传感器实验装置

实验台采用大理石材质来保证外部环境的稳定,传感器的定子和主板电路固定在实验台的基座上不动,转子的定子固定在转轴上,与精度为 $\pm 1''$ 的海德汉光栅同轴安装,由电机驱动转轴旋转。用自制的数据采集卡同步采集时栅和光栅的角度值进行比对,实现精度的检测,实验系统如图 9 所示。

此外,把时栅编码器安装到直驱电机上,时栅编码器作为反馈器件接入高创驱动器,对速度稳定性和跟随误差进行实测,电机实测如图 10 所示。

4.2 传感器实验数据分析

在图 9 的实验平台上采集传感器的误差数据,为了

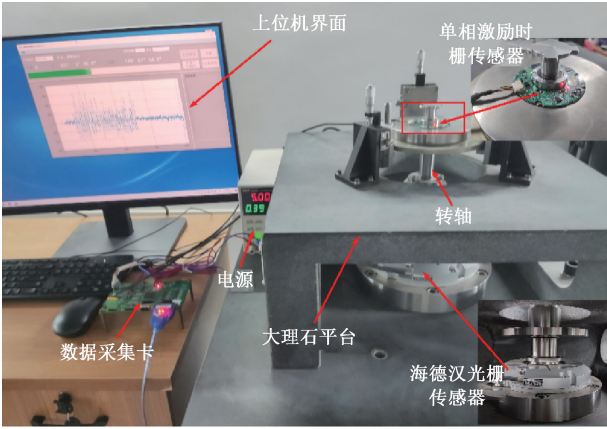


图9 实验系统

Fig. 9 Experimental system

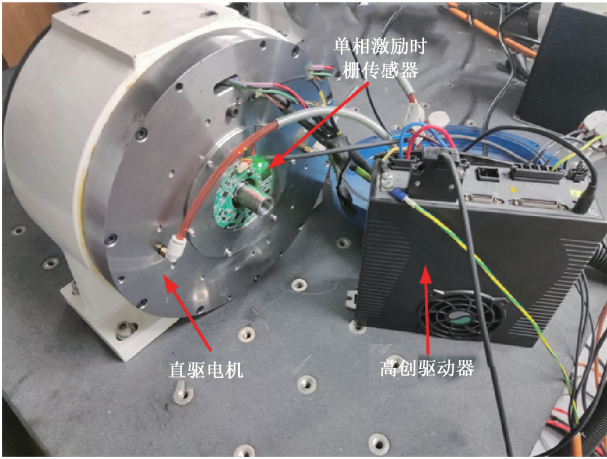


图10 电机实测

Fig. 10 Actual test of motor using sensor

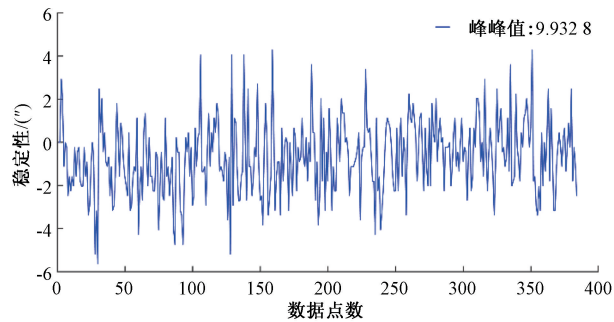
进行对比,实验数据为表 2 中所列出的单相激励和四相激励时栅制作参数的数据,传感器以 18 位的绝对角度输出。图 11 为静止状态下的稳定性数据,单相激励稳定性为 $10''$,四相激励的稳定性为 $35''$ 。

从图 11 可以看出,多相激励的稳定性比较差,主要原因是极对数过少所致,稳定性差会对速度波动产生直接的影响,该稳定性属于随机误差,可以通过数字滤波消除大部分,但增加数字滤波会对跟随误差产生严重的影响。

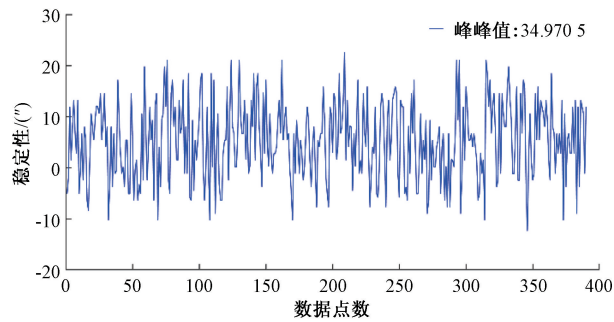
图 12 给出了单相和四相激励传感器的误差曲线,对极内采集 200 个点,单相激励时栅的误差为 $\pm 20''$,四相激励的误差为 $\pm 55''$ 。

分别对上述误差做 FFT 分析,如表 3 所示。

从表 3 可以看出,单相激励的主要误差成分为一次误差和较高频次的误差,一次误差主要由激励极片的加工误差所致,较高频次的误差主要由稳定性的随机误

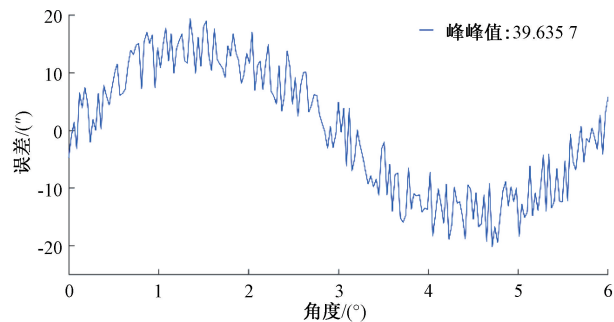


(a)单相激励稳定性
(a)Stability of single-phase excitation

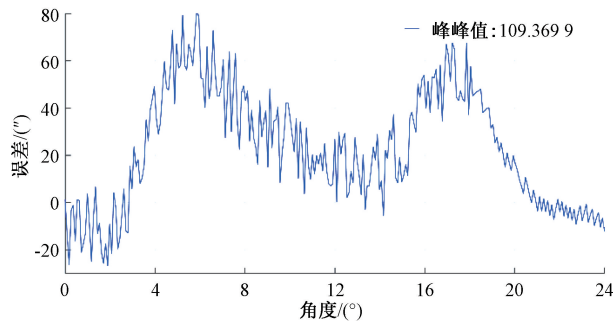


(b)四相激励稳定性
(b)Stability of four-phase excitation

图 11 稳定性对比
Fig. 11 Stability comparison



(a)单相激励误差
(a)Error of single-phase excitation



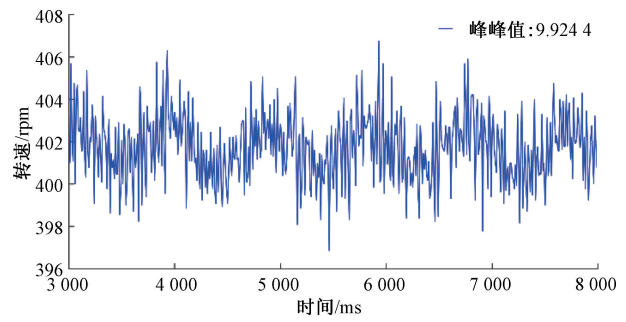
(b)四相激励误差
(b)Error of four-phase excitation

图 12 误差曲线对比
Fig. 12 Error curve comparison

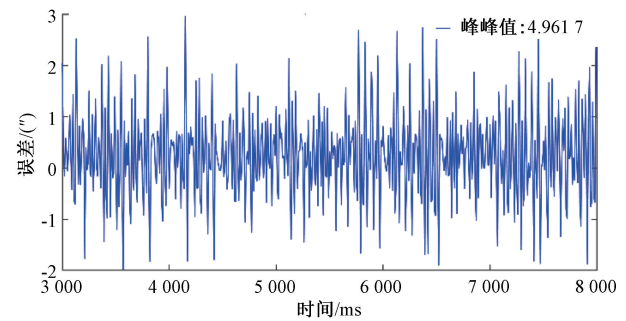
表 3 误差数据幅值谱对比			
Table 3 Amplitude spectrum comparison			
谐波次数	单相激励幅值谱/(°)	谐波次数	四相激励幅值谱/(°)
1	15.252	2	33.065
44	1.013	1	15.743
80	1.003	4	12.932
43	0.960	120	1.087
...	...	...	...

差所致,而四相激励的主要误差成分为一次、二次和四次误差,还伴随有较高频次的误差,一次、二次误差主要由激励的幅值和相位不对称所致,四次误差主要由激励极片的加工误差所致,较高频次的误差主要由稳定性的随机误差所致。

分别把两种传感器适当增加少量相同的数字滤波,安装到直驱电机上进行实测,四相激励的传感器反馈给驱动器后无法驱动电机,单相激励测得的速度波动曲线和跟随误差曲线如图 13(a)和(b)所示,在 400 rpm 下速度波动为 $\pm 1.25\%$ (± 5 rpm),跟随误差为 $\pm 2.5''$



(a)速度波动曲线
(a)Speed fluctuation curve



(b)跟随误差曲线
(b)Following error curve

图 13 单相激励动态性能测试
Fig. 13 Dynamic performance test of single-phase

四相激励传感器无法驱动电机的主要原因是在有限的尺寸下无法布置更多的极对数,造成稳定性差,从而导

致动态性能指标无法满足电机的要求所致。单相激励传感器的动态性能在小尺寸下已达到使用要求。

5 结 论

本文通过分析多相激励角位移传感器存在的问题,提出了一种单相激励时栅角位移传感器,通过理论分析推导出单相激励行波构造方法,并通过电路实现了空间和时间正交的行波。通过实验数据对比了单相激励和四相激励时栅的误差和动态性能。实验结果表明,单相激励的稳定性达到 $10''$,精度达到 $\pm 20''$,400 rpm 时速度波动为 $\pm 1.25\%$ (± 5 rpm),跟随误差为 $\pm 2.5''$,上述指标在同等尺寸和极片数量的情况下优于四相激励传感器,证明了单相激励方法的有效性和可行性。该方法应用于较大尺寸的传感器上会获得更加优良的指标,可满足更高要求应用领域的需求。

参考文献

- [1] 赵长海,万秋华,梁立辉,等. 小型高精度航天级光电编码器[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(8):1224-1230.
ZHAO CH H, WAN Q H, LIANG L H, et al. The small high-precision spaceborne photoelectric encoder [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29 (8): 1224-1230.
- [2] 魏舜昊,章家岩,冯旭刚. 三坐标测量机高速测量过程动态误差分析与补偿[J]. 电子测量与仪器学报,2020,34(5):43-50.
WEI SH H, ZHANG J Y, FENG X G. Dynamic error analysis and compensation of CMM high speed measurement[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020,34 (5): 43-50.
- [3] 田青青,陈锡侯,方畅,等. 基于平面时变磁场的时栅角位移传感器[J]. 传感器与微系统,2020,39(4):52-55.
TIAN Q Q, CHENG X H, FANG CH, et al. Time grating angular displacement sensor based on plane time-varying magnetic field[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020,39 (4): 52-55.
- [4] 杨继森,张迪,卢渝,等. 时栅位移传感器误差动态采样与补偿模型研究[J]. 仪器仪表学报,2022,43(6):9-18.
YANG J S, ZHANG D, LU Y, et al. Study on error dynamic sampling and compensation model of the time grating displacement sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022,43 (6): 9-18.
- [5] 杨继森,周润,张天恒,等. 结构参数约束下的磁场补偿式双层时栅角位移传感器研究[J]. 中国机械工程,2023,34(19):2296-2303,2312.
YANG J S, ZHOU R, ZHANG T H, et al. Research on magnetic field compensated double-layer time-grating angular displacement sensor with structural parameter constraints [J]. China Mechanical Engineering, 2023, 34(19):2296-2303,2312.
- [6] 刘小康,柳康,蒲红吉,等. 基于二次调制的高精度多圈绝对式时栅角位移传感器[J]. 仪器仪表学报,2021,42(5):90-98.
LIU X K, LIU K, PU H J, et al. High-precision multi-turn absolute time-grating angular displacement sensor based on re-modulation scheme[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021,42 (5): 90-98.
- [7] 彭凯,许小虎,王合文,等. 基于 AKF 滤波器的时栅角位移动态误差抑制方法[J]. 仪器仪表学报,2023,44(4):259-270.
PENG K, XU X H, WANG H W, et al. Time-grating angular displacement dynamic error suppression method based on AKF filter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023,44 (4): 259-270.
- [8] DU Y, QING L, HE J. Research on particle swarm fusion sliding mode tracking decoding technology for rotary transformer [C]. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2023, 2428(1): 012029.
- [9] 周力,王林波,王顺,等. 基于圆感应同步器的低速永磁同步力矩电机控制系统[J]. 微特电机,2022,50(6):46-48,55.
ZHOU L, WANG L B, WANG SH, et al. Low-speed permanent magnet synchronous torque motor control system based on circular inductive synchronizer [J]. Small & Special Electrical Machines, 2022,50(6): 46-48, 55.
- [10] 颜亚灵,王洛国,阎瑞,等. 基于 RD26 的双通道旋转变压器位置解码设备的设计[J]. 计算机测量与控制,2023,31(8):190-196,223.
YAN Y L, WANG L G, YAN R, et al. Design of dual channel resolver position decoder based on RD26 [J]. Computer Measurement & Control, 2023,31 (8): 190-196,223.
- [11] 李太平,姜林,陈伟男,等. 多通道感应同步器高精度融合及其 FPGA 实现[J]. 宇航计测技术,2021,41(6):57-62.
LI T P, JIANG L, CHEN W N, et al. Multi-channel induction synchronizer's high-precision fusion and implementation on FPGA [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2021,41 (6): 57-62.
- [12] 杨宁,梁仕斌,杨永明,等. 方波激励下的单相变压器铁心损耗低频测量方法研究[J]. 变压器,2017,

- 54(10):58-63.
- YANG N, LIANG SH B, YANG Y M, et al. Research of low-frequency measurement method for core loss of single-phase transformer based on square-wave excitation[J]. Transformer, 2017,54 (10): 58-63.
- [13] 王瑞锋,王亮,贾博韬,等. 单相驻波驱动的旋转型超声电机结构设计与试验研究[J]. 机械工程学报, 2022,58(7):227-236.
- WANG R F, WANG L, JIA B T, et al. Structural design and experimental studies of rotating ultrasonic motor driven by single-phase standing wave[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022,58 (7): 227-236.
- [14] WANG L, WANG X, JIN J, et al. Transfer matrix modeling on a longitudinal-bending coupled piezoelectric transducer with single-phase excitation: Analysis and verification[J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(9):095006.
- [15] 林知南. 浅谈莫尔条纹两种扫描方法对细分影响[J]. 数字技术与应用,2015(11): 239-240.
- LIN ZH N. An overview of the effect of the two scanning methods of Moore's stripes on segmentation[J]. Digital Technology and Application, 2015 (11): 239-240.
- [16] 任曦,杜升平,陈科,等. 圆光栅编码器测角误差源及频谱分析[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(17): 171-178.
- REN X, DU SH P, CHEN K, et al. Error source and spectrum analysis for angle measurement of circular grating encoder[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020,57 (17): 171-178.
- [17] 张文颖,朱浩然,李楠. 立体光栅测角传感器系统研究[J]. 激光与光电子学进展,2021,58(23):143-148.
- ZHANG W Y, ZHU H R, LI N. Research on stereo grating angle sensor system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021,58 (23): 143-148.
- [18] 付敏,陈凡,朱革,等. 一种基于旋转光场的高精度角位移测量方法研究[J]. 光学学报,2021,41(18): 118-127.
- FU M, CHEN F, ZHU G, et al. High-precision angular displacement measurement based on rotating optical

field[J]. Acta Optica Sinica, 2021,41 (18): 118-127.

- [19] 付敏,李昌利,朱革,等. 单交变光场余弦透光面集成化时栅传感器研究[J]. 仪表技术与传感器,2020(8): 1-6,12.
- FU M, LI CH L, ZHU G, et al. Study on integrated time-grating sensor of cosine grating surfaces with single alternating light field[J]. Instrument Technique and Sensor, 2020 (8): 1-6,12.

作者简介



高忠华(通信作者),2008年于重庆理工大学获得硕士学位,2014年于合肥工业大学获得博士学位,现为重庆理工大学高级工程师,主要研究方向为精密仪器及机械和智能传感器。

E-mail:gzh@cqut.edu.cn

Gao Zhonghua (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2008, and received his Ph. D. degree from Hefei University of Technology in 2014. He is currently a senior engineer at Chongqing University of Technology. His main research interests include precision instrument and machinery and intelligence sensor.



胡帅,2021年于成都大学获得学士学位,现为重庆理工大学硕士研究生,主要研究方向为智能仪器与传感器。

E-mail:hushuai@stu.cqut.edu.cn

Hu Shuai received the B. Sc. degree from Chengdu University in 2021. He is currently a master student at Chongqing University of Technology. His main research interests include intelligent instruments and sensors.



汪强,2021年于重庆理工大学获得学士学位,现为重庆理工大学硕士研究生,主要研究方向为智能仪器与检测技术。

E-mail:wangqiangaec@foxmail.com

Wang Qiang received his B. Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2021. He is currently a master student at Chongqing University of Technology. His main research interests include intelligent instruments and detection technology.