

基于 $d-q$ 变换的时栅位移传感器补偿算法研究*

王 伟¹, 石照耀¹, 彭东林², 赵勇图²

(1. 北京工业大学 北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心 北京 100024;

2. 重庆理工大学 机械检测技术与装备教育部工程中心 重庆 400050)

摘 要:时栅位移传感器是一种新型的栅式位移传感器,它不依赖于空间等分性,通过对时间脉冲进行计数而间接实现位移测量,从而达到高精度测量。介绍了传感器信号变形的原因,将非理想信号分为幅度不均、相位偏移、谐波叠加、波形变形四大类;针对幅度不均的情况,将电机学中的 $d-q$ 变换引入误差分析,推导出其对寄生式时栅位移传感器的误差影响;同时在 $d-q$ 变换原理的视角下重新审视了时栅传感器的测量过程。提出了一种基于变换空间下的误差补偿算法, d 轴的差分项与 q 轴误差项变化趋势一致,利用变化规律对测量误差进行实时修正。在安装有寄生式时栅位移传感器的实验台上进行了实验并获取到不同情况下的误差曲线,实验结果表明,该补偿算法可以消除幅度不均带来的二次误差,误差压制量达到 90%。这种算法完全利用信号本身的特性,无需复杂的运算,将误差部分进行了补偿达到了比较理想的效果,对于寄生式时栅位移传感器的实际应用具有重要意义。

关键词: 误差补偿; $d-q$ 变换; 幅度不均; 时栅位移传感器

中图分类号: TH7 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Research on compensation algorithm of time-grating sensor using $d-q$ transformation

Wang Wei¹, Shi Zhaoyao¹, Peng Donglin², Zhao Yongtu²

(1. Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instrument, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Engineering Research Center of Mechanical Testing Technology and Equipment, Ministry of Education, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Time-grating sensor is a novel sensor and it can achieve very high accuracy owing to a special way that measure time using pulse with high frequency. In this paper, the reasons of signal distortion have been introduced firstly, including the imbalance of amplitude, imperfect quadrature, inductive of harmonics. In particular, aim to the angular deviation from the imbalance of amplitude, the letter introduces the $d-q$ transform from electrical machinery to solve it and deduces the angular deviation. The process of measuring is analyzed using rotating coordinate system where an error compensation algorithm has been proposed. The error would be corrected with a simply way due to the fact that the algorithm utilizes the characteristic of signal completely. Finally, the proposed method was applied to the experimental system and the error of sensor was obtained under different circumstances. Experimental results indicate the curve of error consist of 2th harmonic because of the imbalance of amplitude. The deviation of angular information from the imbalance of amplitude will be eliminated if the algorithm is applied. it will get good result with the algorithm and it will be make sense for time-grating sensor.

Keywords: error compensation; $d-q$ transformation; imbalance amplitude; time-grating sensor

0 引 言

时栅角位移传感器是根据“时-空转换原则”设计的

一种磁感应式角位移传感器,它把对角位移的测量转换成了对时间的测量^[1]。光栅是目前应用最广泛的栅式传感器,精度高、技术成熟,但存在价格、可靠性、抗干扰力等方面的问题,导致我国机械行业中大量依赖昂贵的进

口光栅^[2],和光栅相比,由于分辨率不再依赖于空间等分性,时栅位移传感器在测量原理上具有先天的优势,更容易达到高精度。文献[3]提出了基于交变电场的纳米时栅位移传感器,其精度达到 $\pm 0.2''$,在静态量仪领域已经处于第一梯队,国际领先水平。武亮等人^[4]提出了一种适用于大型,中空回转工作台角度测量的模型,被称为寄生式时栅位移传感器。其基本思想继承于时空转换原则,将磁阻式旋转变压器进行结构分解,设计出一类可嵌入到被测件本体中的特殊传感器,称为寄生式时栅传感器。

相比于传统时栅位移传感器,寄生式时栅位移传感器因为其结构特殊性,需要在结构上做出大量的优化设计,同时借助后期高效的误差修正技术达到比较高的精度。由于寄生式时栅采用离散式测头,不具备圆时栅的圆周封闭性原理^[4],时栅的后级信号处理电路严重依赖于前端结构产生的信号,而由于传感器安装误差,寄生电容等电气因素都会使得产生的信号出现幅度不均,相位伪正交,波形失真等现象,幅度不均成为制约寄生式时栅位移传感器精度提高的重要因素。在现发表的相关文章中,很少有发现对信号的失真度对时栅位移传感器影响的分析,国外相关文章主要集中在解决旋转变压器信号质量这个方向上。Hanselman D. C.^[5-6]在1991年首先提出了旋转变压器信号质量对解算单元的影响,并分析出相关误差项;Hwang S. H. 等人^[7]分析了幅度不均带来的误差并通过同步电机的 $d-q$ 电流来补偿,然而,这种方法的实时性不够好,需要消耗大量的运算时间,并且由于计算会带来截断误差。在国内,文献[4]中对寄生式时栅的测量原理与结构进行了优化,并指出幅度不均会导致误差项的产生,指出两路驻波幅值不均会给测量带来2次误差,可是并没有针对该二次误差提出合理的解决方法。杨洪涛等人^[8]分析了寄生式时栅测头安装间隙、俯仰角和偏角大小对于传感器精度的影响,并给出了仿真分析与实验验证,这仅仅只是从结构上去排除误差,其工作量且复杂,但是对于时栅传感器后级信号的数值波动并没有给出分析,高忠华等人^[9]研究了误差自修正技术,弥补了时栅位移传感器误差获取、补偿的空白。

本文运用 $d-q$ 变换,将时栅行波信号进行了时间与空间的剥离,信号求解过程被假想为三维空间坐标系变换到 $d-q$ 空间坐标系,观察信号幅值不均导致的误差,并运用 d 轴在角度求解过程中,趋于1且变化率小这一特性,将 d 轴信号微分后叠加到 q 轴后,间接的将幅度不均带来的二次谐波波动抵消掉。本文对时栅测量原理进行了介绍,并从 $d-q$ 变换出发重新解释了时栅位移传感器的测量过程;针对于具体误差项提出了补偿算法,给出了MATLAB/SIMULINK仿真,仿真结果表明补偿算法准确可靠。将补偿算法在一台装有寄生式时栅传感器的实验台系统中运用,对比补偿算法使用前后所获得的误差曲

线,分析可知实际结果与仿真结果一致,该方法简单、实用、无需提前测得离线数据然后再补偿,可以成为时栅角位移传感器设计过程中的重要指标。

1 传感器测量模型与信号误差

1.1 寄生式时栅位移传感器测量模型

图1所示为寄生式时栅位移传感器的结构,将绕制的激励线圈与感应线圈作为传感器本体依附于传感器载体(待测的大齿圈),励磁线圈中通入时间相位差为 $\pi/2$ 的激励信号,感应线圈分布在空间相位差为 $\pi/2$ 的位置。当齿圈以角速度 ω 旋转,传感器本体与传感器载体间电磁呈现周期变化,由麦克斯韦电磁方程可以得出图中驻波 S_1 与驻波 S_2 的信号输出值。

$$\begin{cases} S_1 = \sin\omega t \cdot \cos\theta \\ S_2 = \cos\omega t \cdot \sin\theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω 表示载波频率, θ 为调制角度。

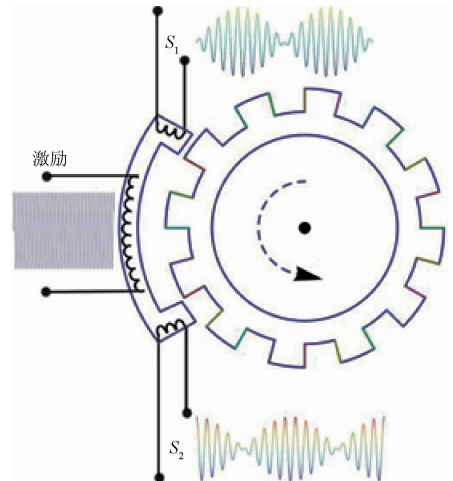


图1 寄生式时栅测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of parasitic time grating displacement sensor

根据时空转化原理^[1],需要将驻波 S_1 与驻波 S_2 合成行波,以激励信号为基准,通过高频脉冲对相位差进行插补求值,测量出待测角度。当被测件高速运动时,待测角度容易被时间项 t 污染,故将驻波 S_1 与驻波 S_2 解包络,剥离出时间项,人为产生一个周期的正弦与余弦信号,将调制角度通过数值运算的方式合成行波,通过行波求解相位差,相比高频脉冲比相方式,这是一种数字式的比相的测量方法,类似于传统ATO^[10-12](angle tracking observer)方式的跟随,但实际上比传统ATO方式简单高效,通过伪时间序列将把 S_1 与 S_2 合成,位移角度被调制到相位项中,得到:

$$f(T, \theta) = \sin(\Omega T - \theta) \quad (2)$$

令式(2)为0,便得到测量的角度。

1.2 信号误差

传感器实际由于安装误差,偏心等问题会导致实际的信号并非理想的信号,从而带来测量误差,信号误差主要包括:1)幅度不均;2)相位误差;3)谐波误差;4)波形变形。

幅度不均一般由于线圈绕制导致,无法保证两路驻波的感应线圈完全一致,现实中无法避免,只能通过人为的调节两路驻波的幅值,使其近似相等。其过程繁琐且效果不明显。相位误差由于感应线圈安装中位置没有相差 $\pi/2$,所以最终导致了驻波中出现相位误差,通过调节线圈安装位置,相位误差可以减小。谐波误差主要因为传感器测量原理导致,其测量的实现依赖于空气隙中的磁通量变化。磁通量变化包含了直流成分和高频成分,直流成分可以通过绕线进行剔除,而高频成分与传感器结构有关,属于系统误差,可以在后期误差修正时进行剔除。波形变形主要来自电子元器件性能影响,容易因温度环境等因素变化而改变。

不考虑相位误差、谐波误差和波形变形的影响,一般,时栅角位移传感器输出的信号可以表示为:

$$\begin{cases} S_1 = \sin\omega t \cdot \cos\theta \\ S_2 = (1 + \alpha) \cos\omega t \cdot \sin\theta \end{cases} \quad (3)$$

式中: α 表示两信号间的不均性。

最终求解的表达式(2)变为式(4)。

$$f(T, \theta) = \sin(\Omega T - \theta) - \alpha \cdot \cos\Omega T \cdot \sin\theta \quad (4)$$

由测量原理可以知道,当 $\Omega T = \theta$ 时,其误差主要来源于第二项 $\alpha \cdot \cos(\omega t) \sin\theta$,将 ΩT 进行近似处理,并利用倍角公式可以得出式(5)。

$$\theta_{\text{error}} = (\alpha/2) \sin(2\theta) \quad (5)$$

很明显,随着角度变化由于幅度不均导致了测量数据中含有二次误差。

2 d-q模型分析与算法

2.1 时栅测量的d-q模型

三相电机中很多参数耦合在一起,无法单独控制,d-q变化是现在主流交流电机的分析方法,通过d-q变换,将交变信号变换到d轴、q轴,可以简化问题并解决。将三相电机中的a-b-c三相变换到d-q轴的关系式^[13]为:

$$\begin{bmatrix} u_d & u_q \end{bmatrix} = \mathbf{C} \cdot \begin{bmatrix} u_a & u_b & u_c \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

其中变量因子为: $\mathbf{C} =$

$$\sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \sin\omega t & \sin(\omega t - \alpha) & \sin(\omega t + \alpha) \\ -\cos\omega t & -\cos(\omega t - \alpha) & -\cos(\omega t + \alpha) \end{bmatrix}.$$

理想三相电压系统中的电压为:

$$\begin{cases} u_a = \sqrt{2}U \sin\omega t \\ u_b = \sqrt{2}U \sin(\omega t - \alpha) \\ u_c = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \alpha) \end{cases} \quad (7)$$

d-q变化的结果为:

$$\begin{cases} u_d = \sqrt{3}U \\ u_q = 0 \end{cases} \quad (8)$$

从式(8)中可以知道,以上分析将三相变化电压转化为静止变量。d-q变换的结果直接简化了分析过程。时栅位移传感器进行角度求解时,也存在时间、空间耦合的情况,如图2所示。

图2所示为待测信号在空间时间幅度三维坐标系下的立体现象,图2中时间与空间的耦合,描述待测角度复杂,时栅位移传感器进行角度求解时,也存在时间、空间耦合的情况,如式(4)中所示。 ΩT 与 θ 同时为函数待求解变量。将电机中的d-q变换运用到时栅行波信号解耦合求解,同样将简化分析过程。

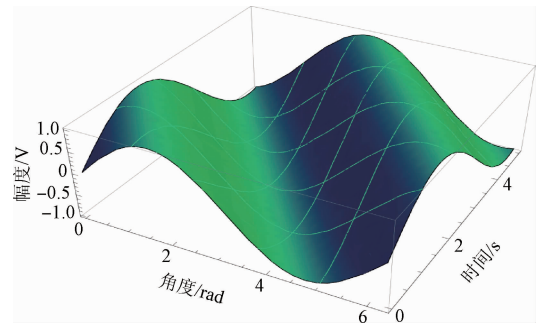


图2 时栅位移传感器行波信号三维图
Fig.2 Travelling wave of displace sensor

图3所示为时栅信号的d-q求解过程,将传感器测量信号表示为向量 \vec{V} ,向量 \vec{V} 被分解为坐标系O-S下的向量 \vec{V}_s 和坐标系O-T下的向量 \vec{V}_t , \vec{V}_t 与T轴的夹角为式(1)中的时间项,以该时间项为基准,对 \vec{V}_t 沿OT轴绕O点旋转,假定激励信号频率为400 Hz,则2.5 ms旋转一次。如式(9)所示。

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \cos\omega t & -\sin\omega t \\ \sin\omega t & \cos\omega t \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \theta) \\ \cos(\omega t + \theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta \\ \cos\theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

图3右下角坐标系表示的是经过时间轴旋转后的信号示意图,只含有待测的角度。那么时栅信号可以表达为一个空间坐标系O-S下的一个向量,称为向量 \vec{V}_s ,其与O-S间的夹角定义为待求角度。

进一步,为了求得角度,引入伪时间序列再次进行空间坐标系旋转A向量进行再次旋转分解。

$$\begin{bmatrix} D \\ Q \end{bmatrix} = \mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} \cos\Omega T & -\sin\Omega T \\ \sin\Omega T & \cos\Omega T \end{bmatrix} \quad (10)$$

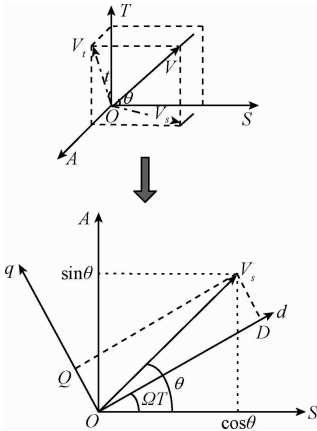


图3 基于d-q的解算过程

Fig. 3 The process of d-q transformation

式中: $D=1, Q=0$ 。

综上所述可以知道经过两次旋转坐标变换后, q 轴与 d 轴变为直流成分, 分别为 0 与 1, 恒定不变。这样可以变换在另外一个空间内去思考时栅位移传感器测量问题, 幅度不均带来的误差问题。基于 $d-q$ 坐标系, 有必要对时栅位移传感器测量原理重新解释: 激励信号被映射到单位旋转圆内, 以角速度 ω 不停的随时间旋转, 激励信号旋转一个周期便确定待测角度 $\theta_i (i=1, 2, \dots)$ 的表达式 $f(T, \theta_i)$, 然后将该表达式进行空间坐标系旋转, D 与 Q 分别定位于两坐标轴上, 且 $D=1, Q=0$, 第 2 次旋转坐标系旋转的角度便为待测角度。

2.2 补偿算法设计

假设由于传感器感应线圈的绕制问题导致余弦项的不均性为 α , 即幅度表示为 $(1+\alpha)$ 。调制、解调、行波合成等过程依次完成后, 不均性将会在出现在式(11)中, 则会产生误差。

$$\begin{cases} Q = \sin(\Omega T - \theta) - \alpha \cos\theta \cdot \sin\Omega T \\ D = \cos(\Omega T - \theta) + \alpha \cos\theta \cdot \cos\Omega T \end{cases} \quad (11)$$

式中: θ 为待求角度, ΩT 为跟随角度, 区间 $[0^\circ, 360^\circ]$ 。

很明显, 若 $\alpha=0$, 则 $Q=0$ 时便测得其角度, 此时 $D=1$, 但当 $\alpha \neq 0$, 求得 $Q=0$ 时, ΩT 趋近于 θ , 存在式(5)所示的误差, 导致了 d 轴上的数值不为 1, 且在 1 附近有频率为 2ω 的波动量, 波动量的幅度为 $\alpha/2$, 图 4 所示为 $\alpha=0$ 与 $\alpha=0.2$ 时, D 轴的变化情况。

由原理可知, 当 ΩT 逼近与 θ 时, 式(11) D 中的第 1 项变化量非常小, 趋近于 0, 也就是其差分趋近 0, 观察第 2 项, 对其差分, D 的第 2 项恰好变为 Q 的第 2 项, 可以得到式(12)。

$$\frac{d_D}{d_{DT}} = -\alpha \sin\Omega T \cdot \cos\theta + \Delta\xi \quad (12)$$

式中: $\Delta\xi$ 为第 1 项差分, 接近 0。

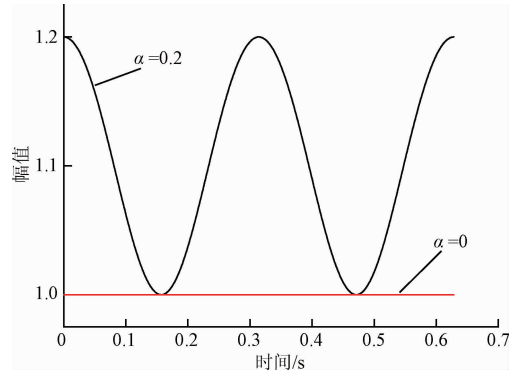


图4 幅度不均对d轴的影响

Fig. 4 Influence in d-axis from imbalance amplitude

将式(12)作为补偿项叠加, 则式(4)可以重新写为:

$$f(T, \theta_i) = Q_i - \frac{D_i D_{i1}}{\Delta T} \quad (13)$$

再次求解 $f(T, \theta_i) = 0$, 得到修正后的角度, 将上述过程迭代, 可以求解角度无限逼近理论值。

传感器初始化完成后, 处于工作状态, 在激励频率的作用下产生周期性的序列 Q_i , 解算模块不断更新 Q_i , 将 Q_i 与设定的阈值进行比较判断 Q_i 是否小于阈值, 若小于阈值表明误差满足要求, 无需校正。

若大于阈值, 按下述步骤进行校正:

步骤 1: Q_i 大于阈值, 则输出传感器角度 φ ;

步骤 2: 将角度 φ 带入 D 的运算公式中得出 D_i , 并将 D_i 与 D_{i-1} 值进行差分, 得出补偿项, 然后将补偿项叠加到 Q_i 中, 重新计算更新后的 Q_i 值;

步骤 3: 再次对更新后的 Q_i 执行步骤 1, 比较 Q_i 与 0 的关系, 不为 0, 继续求解 Q_i , 为 0 则停止输出角度。

3 仿真与实验

3.1 仿真实验

为了验证提出的补偿算法, 基于 SIMULINK 设计了仿真实验, 仿真实验参数如表 1 所示。

表 1 仿真设置参数

Table 1 Parameter of simulation

单元序号	对极数	不均性	幅值
1	1	0.1	1.0
2	1	0.2	1.0
3	1	0.3	1.0
4	1	0.4	1.0
5	1	0.5	1.0

仿真实验中, 假定两路激励信号相位差 $\pi/2$, 感应信

号没有谐波成分和波形失真,仅有幅度的偏差,以表中参数为标准,进行了 5 组仿真实验, α 取值 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5,转速为 300 r/min,角度变化值为 $0^\circ \sim 360^\circ$,分别获取 Q 值、 D 值、补偿项、误差项、输出角度、理论角度数据,并以 $\alpha = 0.2$ 时,绘制出图 5 所示的曲线。

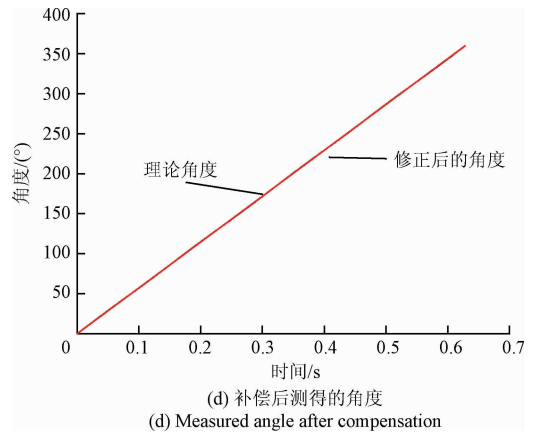
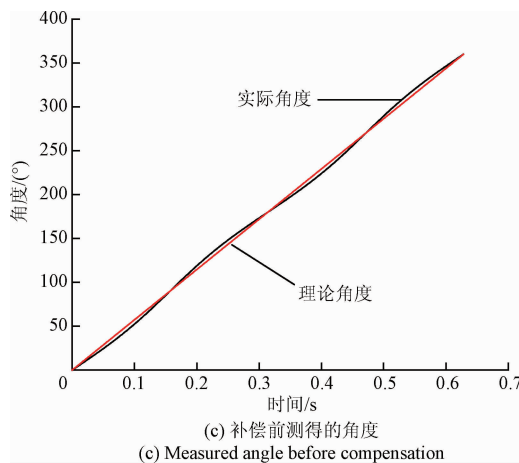
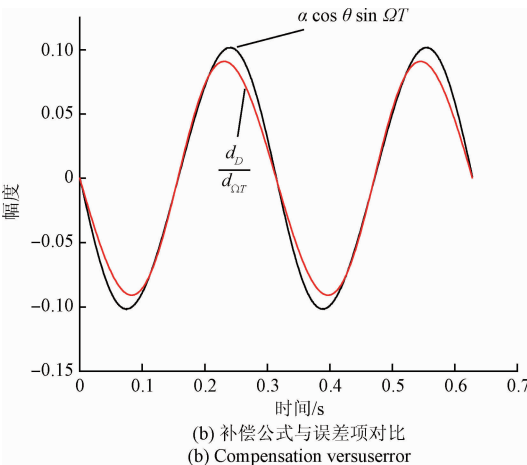
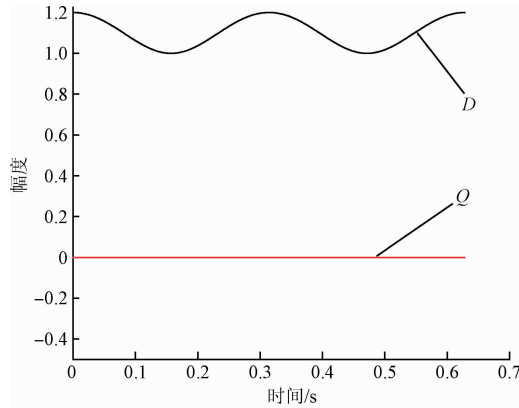


图 5 仿真实验

Fig. 5 Simulation results of MATLAB

图 5 描述了实验的详细结果,图 5(a) 表示测量过程中 q 轴坐标 Q 值与 d 轴坐标 D 值的变化规律,从图中可以看出 D 值在 1 附近存在一个小的波动,且波动量为 $\alpha/2$,波动频率为 2ω 。 Q 值恒为 0,这与分析一致,图 5(b) 描述的是求得的补偿量与待补偿值之间的关系,待补偿量为 Q 值第 2 项 $\alpha \cos \theta \sin \Omega T$,求得补偿量为 d_b/d_{or} ,可以看出两者在形状上大致一样,但是无法完全一致,由于 ΩT 逼近与 θ 时, D 轴第 1 项的差分不为 0,其总的差分存在偏差,这导致了补偿量与待补偿量理论上无法完全重合,但可以根据预设目标,将补偿量进行多次迭代后,可达到预定的效果。图 5(c) 所示为未进行补偿算法测得的角度,可以看出角度呈现出周期性波动,表现为二次谐波。这与分析结果一致,图 5(d) 所示为补偿算法后测得的实际角度,实测角度比较好的跟随了理论角度。对比图 5(c) 与 (d) 可以看出波动被明显抑制,误差被消除。

为了获得纵向对比补偿算法的效果,将 5 组实验的误差数据同时分析,结果如图 6 与 7 所示。分别表示补偿算法执行前后的 5 组仿真实验的角度误差结果,在图 6 中,当 $\alpha = 0.1$ 时误差最大值接近 3° , $\alpha = 0.5$ 时,误差最大值接近 13° ,随着 α 的增大, q 轴第 2 项对于 Q 的影响增大,从而导致误差随着 α 增大而增大。图 7 中,为执行修正算法后的测得角度误差曲线图,可以看出误差被明显压制了。相比未修正时的误差,其压制量接近 90%。综上所述,仿真实验验证了 $d-q$ 轴补偿算法的有效性,二次误差被明显抑制。

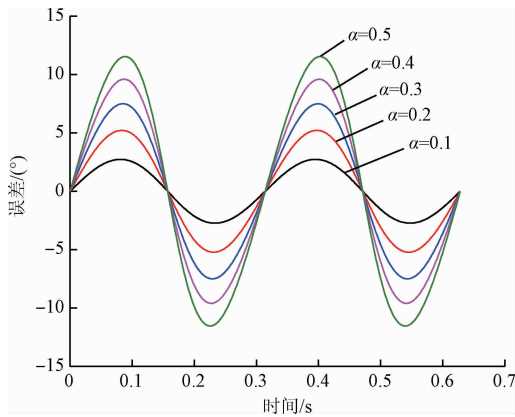


图6 误差分布趋势

Fig. 6 Trend of error distribution

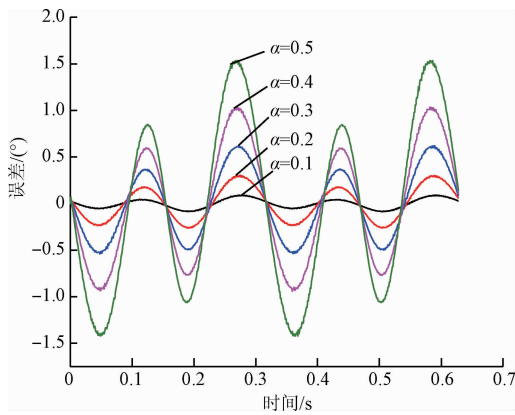


图7 误差抑制效果

Fig. 7 The result of the proposed method

3.2 实验验证

进一步,为了验证算法的可靠性,将补偿算法应用于寄生式时栅位移传感器实际应用中,寄生式时栅参数如表2所示。

表2 寄生式时栅参数

Table 2 Parameters of sensor in experiment

励磁线圈/匝	感应线圈/匝	励磁幅值/mV	标定后误差/(')
30	300	2 000	10

搭建了如图8所示的实验台装置,图8中包含了直驱电机、寄生式时栅、光栅、数据采集设备、解算模块、控制箱等部件。该实验台以回转轴系为基础,同轴安装校准母仪与测试时栅位移传感器,通过电机带动轴转动形成回转坐标系,寄生式时栅位移传感器固定在主轴的上端,其参数如表2所示。同时将 HEIDENHAIN RON886 圆光栅(精度 $\pm 1''$)同轴安装在齿轮下端作为基准传感器。

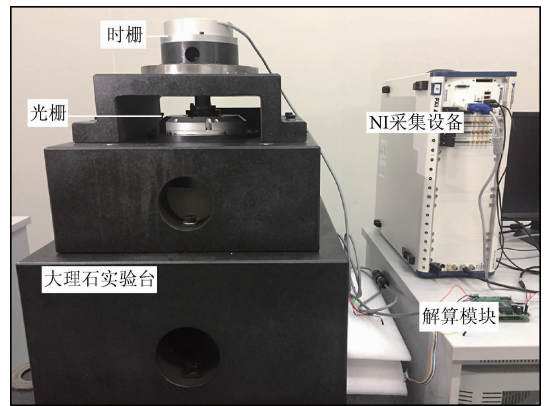


图8 误差修正试验台

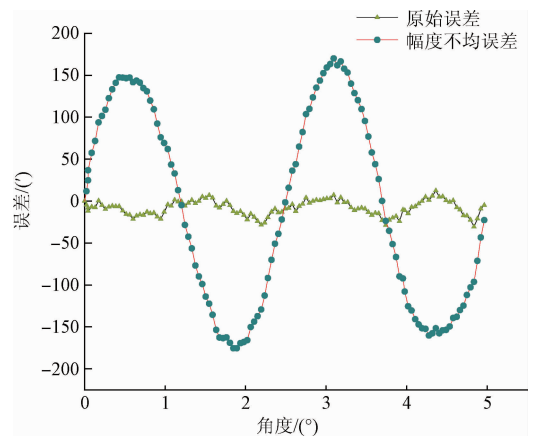
Fig. 8 Experimental equipment of correction error

首先,采用特殊的电路方法将寄生式时栅位移传感器的驻波幅度调节一致后($\Delta < 0.1\%$)。将传感器安置于齿圈测量角度。

其次,从 0° 开始控制电机运动,运动一个对极,范围 $0^\circ \sim 5^\circ$,在对极内,时栅传感器与光栅传感器同时采样角度且以光栅传感器角度为基准,时栅传感器的角度作为待测量,测得寄生式时栅的误差曲线如图9(a)所示,图中的原始误差为此组实验获得的误差曲线,寄生式时栅传感器标定后的误差为 $\pm 10'$ 。

再次,实验中人为将激励余弦信号由原基础调高至5%,造成激励信号幅度不等。重复误差测量过程,如图9(a)所示,图中幅度不均误差为此组实验记录的误差曲线。对比可知,余弦激励信号幅度增大到2 100 mV时,误差主要为二次谐波成分,最大误差约 $150'$ 。

最后,图9(b)中采用上文提出的算法对传感器误差进行修正后获取的误差曲线图,可以看出幅度不均带来的误差被严重抑制,但是和仿真结果比较,效果稍差。这是由于传感器并没有达到理想中的两路驻波相等的条件,导致任然有部分残差未被补偿。



(a) Original error curve of sensor

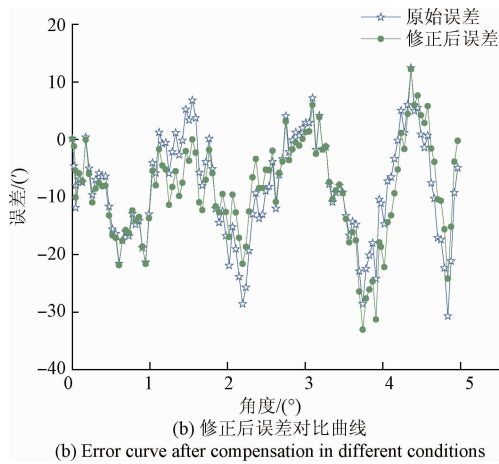


图9 误差对比曲线

Fig.9 Error curve in different conditions

4 结 论

本文提出的基于 $d-q$ 轴的补偿算法。能够有效的抑制由于幅度不均带来的测量误差。本文首先从 $d-q$ 轴旋转坐标系的思想入手,重新对寄生式时栅位移传感器的测量原理进行解释,发现了 d 轴的波动和测量误差有着直接的联系。然后提出了基于 $d-q$ 轴的差分补偿算法,并通过仿真实验验证了算法的正确性与可靠性。并搭建了实验台进一步验证,实验表明该补偿算法能够有效的对误差进行抑制,特别是不均性小于100 mV时特别明显。进一步地,若将算法进行优化,通过迭代运算可以将误差控制在理想的范围内。

本研究对寄生式时栅位移传感器的信号处理具有重要的意义。进而可以推广到旋转变压器、感应同步器等类似的传感器应用。

参考文献

[1] 汤其富, 彭东林, 武亮, 等. 时栅角位移传感器中的多普勒效应影响及其抑制方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3):620-626.
TANG Q F, PENG D L, WU L, et al. Study on the influence of Doppler effect and its suppressing method in time grating angular displacement sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(3):620-626.

[2] 彭东林, 刘小康, 张兴红, 等. 时栅位移传感器原理与发展历程[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版, 2010, 24(10):40-45.
PENG D L, LIU X K, ZHANG X H, et al. The principle and development process of time grating sensor[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2010, 24(10):40-45.

[3] 刘小康, 彭凯, 王先全, 等. 纳米时栅位移传感器的理

论模型与误差分析[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5):1136-1142.

LIU X L, PENG K, WANG X Q, et al. Theoretical model and error analysis of nanometer time grating displacement sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(5):1136-1142.

[4] 武亮, 彭东林, 汤其富, 等. 寄生式时栅位移传感器测量原理与结构优化[J]. 仪器仪表学报, 2016, 17(5):976-984.

WU L, PENG D L, TANG Q F, et al. Measurement principle and structure optimization of parasitic time grating sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 17(5):1136-1142.

[5] HANSELMAN D C. Resolver signal requirements for high accuracy resolvers to digital conversion[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1991, 37(6):556-561.

[6] HANSELMAN D C. Techniques for improving resolvers to digital conversion accuracy[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1992, 38(6):501-504.

[7] HWANG S H, KIM H J, KIM J M, et al. Compensation of amplitude imbalance and imperfect quadrature in resolver signals for PMSM drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 47(1):1720-1725.

[8] 杨洪涛, 章刘沙, 费业泰, 等. 寄生式时栅角位移传感器误差源分析与验证[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2016, 44(6):40-45.

YANG H T, ZHANG L SH, FEI Y T, et al. Error source analysis and verification of parasitic time grating angular displacement sensor[J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2016, 44(6):40-45.

[9] 高忠华, 陈锡侯, 陈鸿雁. 寄生式时栅传感器自标定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(5):975-981.

GAO ZH H, CHEN X H, CHEN H Y. Investigation on self-calibration method of parasitic type time grating sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(5):976-981.

[10] KHABURI D A. Softwarebased resolver to digital converter for DSP based drives using an improved angle tracking observer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2012, 61(4):922-929.

[11] KIM J K, LEE C S. Angular position error detection of variable reluctance resolver using simulation based approach[J]. International Journal of Automotive

- Technology, 2013, 14 (4): 651-658.
- [12] KIM K C, HWANG S J, SUNG K Y, et al. A study on the fault diagnosis analysis of variable reluctance resolver for electric vehicle [J]. Sensors, 2010, 53 (24): 290-295.
- [13] 马莉, 周景海, 吕征宇, 等. 一种基于 $d-q$ 变换的改进型谐波检测方案的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(10): 55-58.
- MA L, ZHOU J H, LU ZH Y, et al. An improved harmonic detecting approach based on dq rotating coordination transformation [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(10): 55-58.
- [14] 陈晓怀, 杜国山, 程真英. 光栅测量系统的误差研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(3): 187-191.
- CHEN X H, DU G SH, CHENG ZH Y. Research on dynamic error of grating measurement system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(3): 187-191.
- [15] 杜璧秀, 米阳, 张淑梅. 变结构控制在高精度转台系统中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(9): 68-71.
- DU B X, MI Y, ZHANG SH M. Application of variable structure control for high precision turntable [J]. Foreign

Electronic Measurement Technology, 2014, 33 (9): 68-71.

作者简介



王伟, 分别在 2010 年和 2013 年于重庆理工大学获得学士学位和硕士学位, 现为北京工业大学博士研究生, 主要研究方向为精密测试技术及仪器。

E-mail: wangwe@163.com

Wang Wei received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Chongqing University of Technology in 2010 and 2013, respectively. Now he is a Ph. D. candidate in Beijing University of technology. His main research interests include precision measurement technology and instrument.



彭东林(通讯作者), 1992 年于重庆大学获得博士学位, 现为重庆理工大学教授、重庆大学、合肥工业大学博士生导师, 主要研究方向为精密测试技术及仪器。

E-mail: pdl@cqut.edu.cn

Peng Donglin (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Chongqing University in 1992. He is currently a professor in Chongqing University of Technology, and a doctoral supervisor in Chongqing University and Heifei University of Technology. His main research direction is precision measurement technology and instrument.