

文章编号 1004-924X(2016)02-0319-08

## 寄生式时栅安装误差对传感器测量精度的影响

杨洪涛<sup>1\*</sup>, 章刘沙<sup>1</sup>, 周 姣<sup>1</sup>, 费业泰<sup>2</sup>, 彭东林<sup>3</sup>

- (1. 安徽理工大学 机械工程学院, 安徽 淮南 232001;
2. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;
3. 重庆理工大学 电子信息与自动化学院 重庆 400054)

**摘要:** 为了提高寄生式时栅行波信号的质量和传感器的测角精度, 研究了离散式测头安装误差对传感器测角精度的影响。介绍了寄生式时栅的结构组成和工作原理, 建立了三维仿真模型, 应用 Ansoft Maxwell 仿真软件对测头与转子不同间隙、测头的俯仰角和偏摆角大小变化对传感器测角精度的影响进行了仿真实验分析, 同时应用 84 对级的寄生式时栅搭建实验平台进行了实际实验验证。仿真和实验结果显示: 安装误差中的间隙、俯仰角、测头的偏摆角等因素变化对传感器测量精度均有影响。间隙变化对测量精度的影响具有规律, 可通过建模进行修正。实验所用的 84 对级的寄生式时栅最佳安装间隙大小为 0.2 mm。俯仰角、偏摆角的变化对测量精度的影响规律变化较复杂, 故文中建立了相应的误差补偿模型。本文的研究结果可用于指导传感器的结构优化设计、测头的安装和误差精确补偿, 进而提高传感器的测角精度。

**关键词:** 寄生式时栅; 时栅传感器; 测角精度; 安装误差; Ansoft maxwell; 实验验证

**中图分类号:** TP212.12; TH712 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162402.0319

### Effect of installation error of parasitic time grating on sensor measuring accuracy

YANG Hong-tao<sup>1\*</sup>, ZHANG Liu-sha<sup>1</sup>,  
ZHOU Jiao<sup>1</sup>, FEI Ye-tai<sup>2</sup>, PENG Dong-lin<sup>3</sup>

- (1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;
  2. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
  3. School of Electronic Information and Automation, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)
- \* Corresponding author, E-mail: lloyd@163.com

**Abstract:** To improve the signal quality and angle measuring accuracy of a parasitic time grating sensor, the effect of installation errors of a discrete probe on the angle measuring accuracy of the sensor was researched. The structural components and working principle of parasitic time grating were intro-

收稿日期: 2015-08-19; 修订日期: 2015-09-21.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51107001); 时栅传感及先进检测技术重庆市重点实验室研究基金资助项目(No. KFKT2013001)

duced, and a 3D simulation model of parasitic time grating sensor was built. The Ansoft Maxwell simulation software was used to analyze the influences of different gap sizes between probe and rotor, the size changes of the pitch and yaw angles of the probe on the measurement accuracy of the sensor. Meanwhile, an experimental platform was built by using the 84-level parasitic time grating to verify the actual experiment. The simulation and actual experimental results show that the gap, the pitch angle and yaw angle of the probe in the installation errors all influence the accuracy of the sensor. The influence of gap variation on the measurement accuracy is regular and can be corrected by modeling. The optimal installation gap size of the researched 84-level parasitic time grating is 0.2 mm. Moreover, the modeling method of the pitch and swing angles affecting the accuracy of the sensors is built due to their complex changing principles. The acquired results can be used to research further on the structure optimization, precisely installation and error correction of the sensors and can improve the measurement accuracy of the sensor.

**Key words:** parasitic time grating; time grating sensor; angle-measuring accuracy; installation error; Ansoft Maxwell; experimental verification

## 1 引言

传统的圆光栅、角编码器、磁栅等传感器无法解决在强冲击振动、油浸等恶劣条件下的“大型、重载、中空”等回转装备的无法安装运动位置实时检测传感器的难题<sup>[1,2]</sup>。时栅传感器是基于“用时间量测量空间位移”原理研发的传感器,分为角位移测量和线位移测量两大类。其中角位移传感器分为场式时栅、变耦合系数时栅、寄生式时栅等,三者具有不同工作原理和结构<sup>[3]</sup>。其中寄生式时栅角位移传感器(后简称寄生式时栅)作为一种新型角位移传感器<sup>[4]</sup>,与较为成熟的场式时栅<sup>[5]</sup>、变耦合系数时栅角位移传感器<sup>[6]</sup>采用整圈的定子线圈相比,采用离散定子线圈的全新检测技术。在使用过程中,由于寄生式时栅是利用固定螺钉安装在被测对象圆周,比场式时栅、变耦合系数时栅存在着更多的人为安装误差,主要有测头与被测对象之间的间隙不均匀,测头与被测对象在水平、垂直方向不平行导致的附加偏摆角、俯仰角,长期使用过程中由于振动、螺钉松动引起的测头与被测对象之间的间隙、偏摆角、俯仰角变化等。这些误差是寄生式时栅的主要测量误差来源之一。为了分析和减小上述误差来源对测量精度的影响,本文建立了寄生式时栅的三维模型,通过人为改变测头与被测对象之间的间隙、偏摆角、俯仰角大小,采用 Ansoft Maxwell 软件,对在不同间隙、偏摆角、俯仰角下的输出行波信号质量和传

感器测角精度进行仿真分析,获得误差源对测量精度的影响规律,进而获得最佳间隙大小,并进行实验验证,可用于指导后续的寄生式时栅结构、安装位置的优化设计和误差修正模型的建立。

## 2 结构与测量原理

寄生式时栅如图 1(a)所示,由离散定子测头和被测对象等组成,采用离散定子线圈全新检测技术,将被测齿轮、蜗轮、蜗杆、齿条等当作均匀分度的“齿栅”,实现角位移测量的传感器。寄生式时栅具有 2 路激励线圈与 1 路感应线圈,绕制在离散定子测头上,如图 2 所示。离散定子测头沿被测对象圆周安装,由螺钉固定,并进行调整,使测头与被测对象存在一定的间隙,同时使轴线之间尽量保持平行。

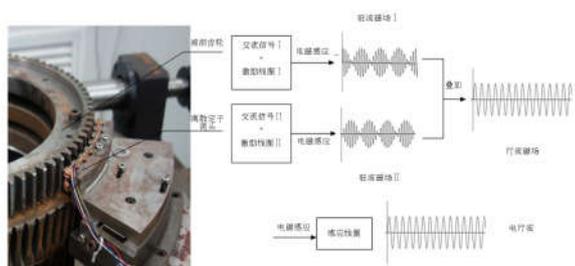
寄生式时栅是通过在测头的两路激励线圈施加两路正交的正弦信号和余弦信号,在感应线圈中感应出两路拍频驻波信号,由两路拍频驻波叠加成电行波信号。电行波信号中包含了时间变量和空间位移 2 个参数,通过处理行波信号的相位,就可得到转子在不同时刻的空间角位移<sup>[7,8]</sup>。寄生式时栅的测量原理如图 1(b)所示。

感应线圈内的行波信号经过整形电路整形成方波信号,利用数字信号处理电路得到整形方波信号的周期  $T$  以及与标准位置信号(原始激励信号正向过零点)的相位时间差  $\Delta T$ ,通过数据处理模块计算出当前测量的角位移大小,该角位移  $\theta$

可以表示为:

$$\theta = \Delta T \times \frac{W}{T}, \quad (1)$$

式中:  $W$  为空间当量,即传感器测头 1 个对极所对应的角度值,  $\Delta T$  为感应信号与参考信号正向过零点的时间差,  $T$  为行波信号的周期。



(a) 结构图

(b) 原理图

(a) Structural diagram (b) Schematic diagram

图 1 寄生式时栅的结构和工作原理

Fig. 1 Structure and working principle of parasitic time grating

从寄生式时栅的结构和工作原理分析可知,寄生式时栅的测量精度与感应行波信号的质量有关<sup>[9-13]</sup>。时栅离散式测头安装在被测对象圆周,测头与被测对象之间通过磁场感应原理产生行波,因此影响行波质量的主要误差来源为测头与被测对象之间的气隙变化(由两者的间距变化引起)、相对有效面积的变化(由测头与被测对象轴线之间的垂直俯仰角、水平偏摆角变化引起)。上述两种误差源主要取决于寄生式时栅的安装调整误差,因此必须对测头与被测对象之间间距、俯仰角、偏摆角变化对时栅测量精度的影响进行进一步分析。

### 3 仿真分析

从上述分析可知,寄生式时栅安装精度的影响因素包括测头与被测对象的间隙、俯仰角、偏摆角变化等。由于寄生式时栅结构复杂,对上述误差源进行理论建模分析较为困难,因此本文采用仿真方法进行分析。寄生式时栅测头与被测对象的间隙、俯仰角、偏摆角变化和行波质量之间的关系分析属于电磁场分析问题。本文应用 Ansoft Maxwell 软件进行建模与仿真。寄生式时栅主要由转子、测头和激励、感应绕组组成,依据传感器

的实际设计、加工和装配参数绘制三维模型如图 2 所示。在三维瞬态场中按照实际参数依次设置仿真模型的激励信号、线圈匝数、边界条件、运动特征、网格划分和分析设置,参数设置完毕之后,即可进行有限元计算与后处理<sup>[14]</sup>。

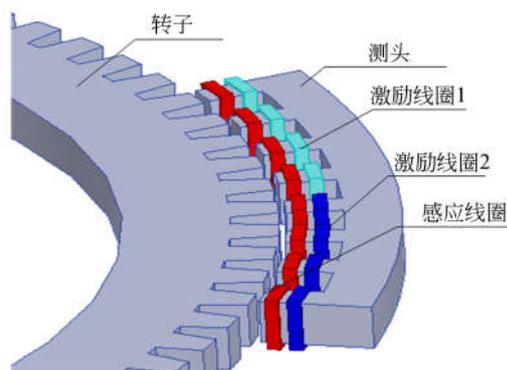


图 2 寄生式时栅电磁场仿真模型

Fig. 2 Electromagnetic simulation model of parasitic time grating

在实际应用中,需要分析转子和测头的间隙、测头的俯仰角、测头的偏摆角等因素对测角精度的影响程度。为了更好的比较这些因素对行波信号的影响,利用控制变量法,设置各影响因素为不同的值,分别仿真与分析每种因素下的感应行波信号曲线,即可得出各影响因素对测角精度的影响程度。

为了确定各变量因素对传感器测角精度的影响,结合信号整形原理,定义在不同因素水平下的各行波信号的零位与标准参考行波的零位之差  $\Delta t$  为零位的波动值,用于作为比较各因素影响程度的参数。式(1)中的感应信号与参考信号正向过零点的时间差  $\Delta T$  是直接受到参数  $\Delta t$  的影响,零位的波动值越大,感应信号与参考激励信号正向过零点的时间差越大,测量的角度就越大。即  $\Delta t$  直接决定着传感器的测量精度,是衡量测角精度高低的标准。因此将仿真分析安装位置的各因素大小变化对  $\Delta t$  的影响,从而确定各因素对测角精度的影响程度。

#### 3.1 测头与转子间隙大小的影响

磁力线穿过测头与转子相对面的径向间隙指的是测头与转子之间的气隙宽度。该气隙宽度受到动测头安装误差和动测头、转子(被测对象)的圆度、表面粗糙度等加工误差的影响。设定气隙

宽度分别为 0.08, 0.2, 0.5 和 0.75 mm, 分别计算出每一种情况下的仿真结果, 绘制的 4 种情况下的感应行波信号曲线如图 3 所示。由图 3 可知, 行波信号上的过零标记点  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ 、 $m_4$  的幅值( $y$  坐标)为零, 读取这些点  $x$  坐标的值, 即可确定各行波过零点相位时间差  $\Delta t$ , 具体计算结果如表 1 所示。

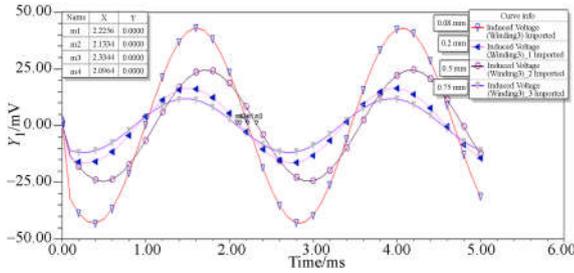


图 3 气隙宽度对行波的影响

Fig. 3 Effect of gap width on the electric traveling wave

表 1 气隙宽度对行波过零点的影响

Tab. 1 Effect of the gap width on the  $\Delta t$  (ms)

气隙宽度	$x$	$x'$	$\Delta t$
0.08 mm	2.225 6	2.225 6	0
0.20mm	2.133 4	2.225 6	0.092 2
0.50 mm	2.334 4	2.225 6	0.108 8
0.75 mm	2.096 4	2.225 6	0.129 2

由仿真结果和表 1 可知: 随着气隙宽度的增加, 感应信号的幅值发生变化, 过零点的位置也发生变化, 行波信号过零点时间差  $\Delta t$  的值逐渐增大, 即当测头与转子的间隙由 0.08, 0.2, 0.5 和 0.75 mm 逐渐增大时, 对传感器的测角精度的影响程度越来越大。因此, 在确保机械加工、安装、定位等的前提下, 要求测头和转子的气隙宽度越窄越好, 传感器的测量精度就越好。

### 3.2 测头俯仰角大小的影响

测头在安装时, 会存在人为的安装精度误差, 其轴线与被测对象轴线不会严格保证平行, 在垂直方向存在偏移角(俯仰角), 影响传感器测量精度。因此根据传感器的实际安装精度, 在仿真模型中设定测头俯仰角分别偏转  $0^\circ$ 、 $0.4^\circ$ 、 $0.8^\circ$  和  $1.2^\circ$ , 绘制的感应行波信号曲线如图 4 所示。由图 4 可知, 行波信号上的过零标记点  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ 、 $m_4$  的幅值( $y$  坐标)为零, 读取这些点  $x$  坐标的值, 即

可确定各行波过零点相位时间差, 具体计算结果如表 2 所示。

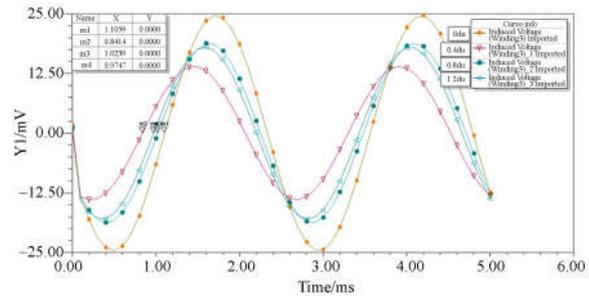


图 4 测头俯仰角对行波的影响

Fig. 4 Effect of probe pitch on the electric traveling wave

表 2 测头俯仰角对行波过零点的影响

Tab. 2 Effect of probe pitch on the  $\Delta t$  (ms)

俯仰角	$x$	$x'$	$\Delta t$
$0^\circ$	1.105 9	1.105 9	0
$0.4^\circ$	0.841 4	1.105 9	0.264 5
$0.8^\circ$	1.023 9	1.105 9	0.082 0
$1.2^\circ$	0.974 7	1.105 9	0.131 2

由仿真结果和表 2 可知: 随着测头俯仰角的增加, 感应信号的幅值发生明显变化, 过零点的位置也发生变化, 行波信号零位的交点变化时间差的值也出现波动。这是由于当测头俯仰角发生变化时, 测头与转子的相对面积发生变化, 激励绕组和感应绕组位置也发生相对变化, 所以测头、被测对象间形成的磁回路路径发生了变化, 直接影响行波的质量, 最终影响传感器测量角度的精度。

### 3.3 测头偏摆角大小的影响

测头在进行安装时, 其轴线与被测对象轴线不会严格保证平行, 在水平方向存在偏移角(偏摆角), 这样会导致测头和转子的气隙不均, 同时相对面积也发生变化, 影响传感器测量精度。因此根据传感器的实际安装精度, 在仿真模型中设定测头偏摆角偏摆  $0^\circ$ 、 $0.1^\circ$ 、 $0.2^\circ$  和  $0.3^\circ$ , 分别计算出每一种情况下的仿真结果, 感应行波信号曲线如图 5 所示。行波信号上的过零标记点  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$ 、 $m_4$  的幅值( $y$  坐标)为零, 读取这些点  $x$  坐标的值, 即可确定各行波过零点相位时间差  $\Delta t$ , 具体计算结果如表 3 所示。

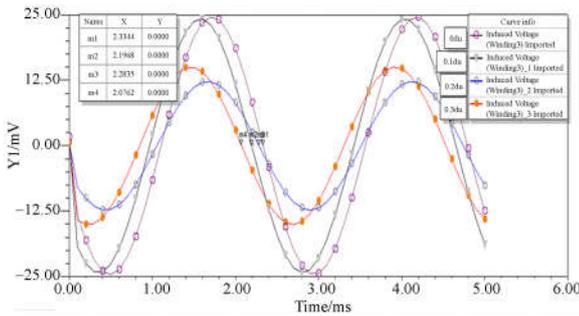


图 5 测头偏摆角对行波的影响

Fig.5 Effect of probe yaw on the electric traveling wave

表 3 测头偏摆角对行波过零点的影响

Tab.3 Effect of the probe yaw on the  $\Delta t$  (ms)

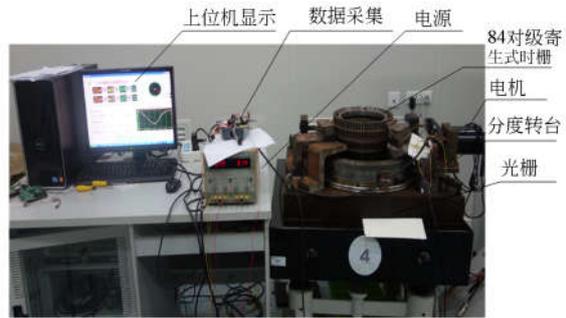
偏摆角	$x$	$x'$	$\Delta t$
$0^\circ$	2.334 4	2.334 4	0
$0.1^\circ$	2.196 8	2.334 4	0.137 6
$0.2^\circ$	2.283 5	2.334 4	0.050 9
$0.3^\circ$	2.076 2	2.334 4	0.258 2

由仿真结果和表 3 可知:随着测头偏摆角的增加,感应信号的幅值发生明显变化,过零点的位置也发生明显变化,行波信号零位的交点变化时间差  $\Delta t$  的值也出现波动,影响最后的测角精度。因为当测头发生偏摆时,测头与转子的相对面积发生变化,同时间隙也不均匀,且激励绕组和感应绕组位置发生相对变化,形成的磁回路路径就发生了变化,会影响行波的质量,最终影响测量角度。因此,实际安装传感器时,动测头安装需要尽可能提高与转子圆周的平行度,防止发生测头偏摆角的偏摆对测角精度的影响。

#### 4 验证实验与数据分析

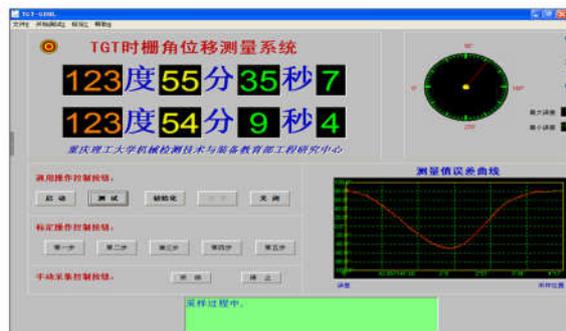
为了验证上述仿真分析的结果,建立了实验装置进行实际测试和验证。实验系统如图 6(a)所示,由 84 对级的寄生式时栅、高精度的海德汉圆光栅、精密分度转台、电机、数据采集系统和上位机组成。将时栅和光栅传感器通过同心轴系安装在精密分度转台的主轴上,电机通过蜗轮蜗杆传动带动分度转台做匀速运动。将圆光栅作为角度测量基准,时栅和光栅按照相同的采样周期进行同步采样,两者比较得到了寄生式时栅的角度测量误差,由上位机实时显示时栅、光栅测量值和

测量误差曲线图,如图 6(b)所示。



(a) 系统实物图

(a) System physical map



(b) 上位机界面

(b) Computer interface

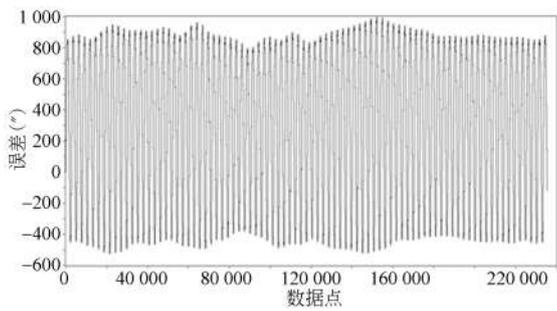
图 6 实验系统实物图和上位机界面

Fig.6 Experiment system and computer interface

#### 4.1 间隙影响实验结果分析

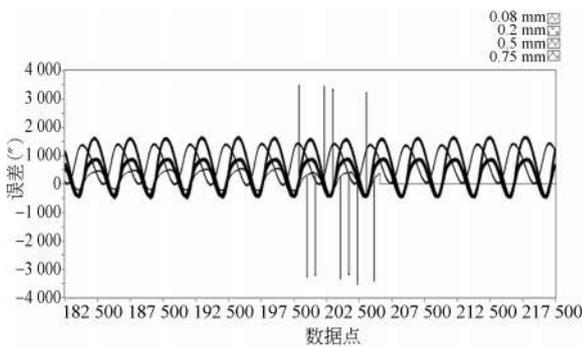
进行间隙实验时,将寄生式时栅与被测齿轮之间的间隙分别调整 0.08, 0.2, 0.5 和 0.75 mm 进行安装和测试。其中所采集到的间隙大小为 0.2 mm 的寄生式时栅整圈误差数据如图 7(a)所示。同理得到间隙分别为 0.08, 0.5 和 0.75 mm 时的寄生式时栅整圈误差数据。将这 4 种误差曲线进行综合分析,比较峰值大小,如图 7(b)所示。

由图 7 可知,当间隙越来越大时,整圈误差曲线峰峰值越来越大,即误差越来越大,影响寄生式时栅的精度。这与上面仿真分析的结论一致,即间隙从 0.08、0.2、0.5 和 0.75 mm 逐渐增大时,误差也越来越大,实验验证了仿真实验分析结果的正确性。但是从图 7 中可以看出,当间隙调整至 0.08 mm 时,行波信号误差的峰峰值较小,但存在误差曲线的突变,这是因为寄生式时栅为离散定子的结构,其同时存在结构误差和安装误差,结构误差是传感器本身内部的误差,而安装误差



(a) 间隙为 0.2 mm 的整圈误差数据

(a) Error data of the 0.2 mm gap



(b) 间隙调整对整圈误差的影响

(b) Effect of gap adjustment on the whole circle error

图 7 整圈误差数据分析曲线

Fig. 7 Analysis curve of error data

是人为误差,当转子和离散定子测头间隙调整为 0.08 mm 时,由于存在转子的偏心误差和圆度误差,导致转子和测头间隙不稳定,使传感器误差发生间歇性突变,所以 0.08 mm 不是该传感器的最优间隙距离。因此在传感器实际的加工安装中,转子和测头的间隙并非越小越好,须根据传感器实际的加工精度和定位安装水平选择合适的最佳间隙。传感器测头铁芯(定子)和被测齿轮(转子)等存在着圆度、跳动等加工误差和偏心、轴线偏摆等安装误差,因此必须考虑利用现有的加工手段和装配方法能达到的加工精度、装配精度和电行波的实际质量进行综合确定最佳间隙。在实际研制过程中,考虑到测头与转子的实际加工、装配误差和大量实际实验中时栅行波测试结果,最终确定测头与被测对象间的间隙最佳为 0.2 mm。该间隙在工程上可以利用塞尺等调整得到。

#### 4.2 俯仰角、偏摆角影响建模

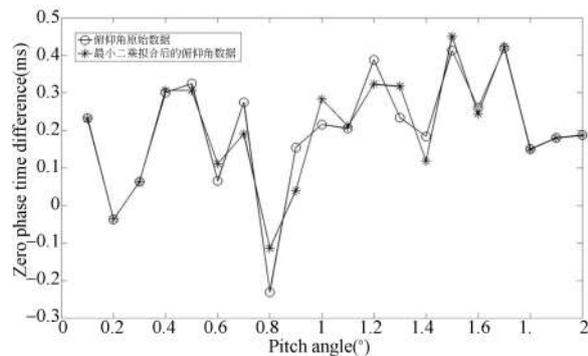
进行俯仰角实验时,将寄生式时栅测头一侧用量块垫起,角度为 0~2°。以角度间隔变化 0.

1°进行实验,分别测得每个俯仰角下寄生式时栅行波信号过零位相位时间。将各个俯仰角的过零位相位时间减去俯仰角为 0°的过零点相位时间,得到不同俯仰角的行波信号过零点相位时间差,如图 8(a)所示。由图 8(a)可知,俯仰角变化对测量精度的影响规律较复杂,这与上面的仿真结果一致。为了建立精确的误差补偿模型,利用最小二乘法建立俯仰角引起的时栅行波信号过零位误差补偿模型,如式(2)所示。

$$e_{\alpha} = 15.7209\alpha^8 - 138.058\alpha^7 + 503.7997\alpha^6 - 986.8439\alpha^5 + 1117.3\alpha^4 - 732.3035\alpha^3 + 262.3035\alpha^2 - 44.7464\alpha + 2.7248, \quad (2)$$

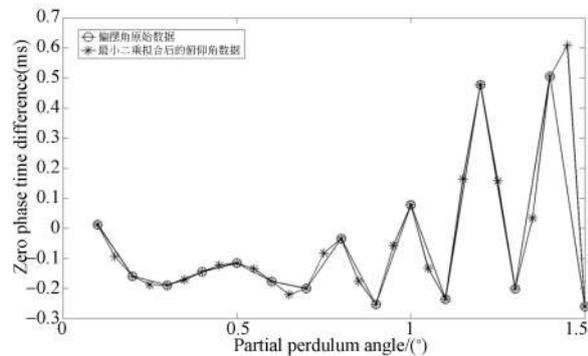
式中:  $e_{\alpha}$  为俯仰角引起的时栅行波信号过零位误差,  $\alpha$  为俯仰角。

同样进行偏摆角实验时,设计调整装置将寄生式时栅测头以中心线偏摆,偏摆的角度为 0~



(a) 俯仰角零点相位时间差

(a) Pitch angle zero phase time difference



(b) 偏摆角零点相位时间差

(b) Zero phase time difference of partial pendulum angle

图 8 俯仰角与偏摆角实验数据分析

Fig. 8 Experimental data analysis of pitch angle and yaw angle

1.5°,以间隔为0.1°进行实验,与俯仰角实验相同,得到不同偏摆角的行波信号过零点相位时间差,如图8(b)所示。由8(b)可知,偏摆角对测量精度影响规律也较复杂。同样利用最小二乘法建立偏摆角误差引起的时栅行波信号过零位误差补偿模型:

$$e_{\beta} = -3\ 548.1\beta^{10} + 27\ 714\beta^9 - 93\ 422\beta^8 + 178\ 040\beta^7 - 211\ 080\beta^6 + 161\ 420\beta^5 - 79\ 873\beta^4 + 24\ 948\beta^3 - 4\ 634.5\beta^2 + 452.75\beta - 17.30, \quad (3)$$

式中: $e_{\beta}$ 为偏摆角误差引起的时栅行波信号过零位误差, $\beta$ 为偏摆角。

## 5 结 论

为了提高寄生式时栅行波信号的质量和测角

精度,本文对传感器的离散定子测头的安装精度对其测量精度的影响进行仿真分析与实验验证。实验结果表明,安装误差中的测头与转子之间的间隙、测头的俯仰角、测头的偏摆角等影响因素对传感器测量精度均有影响。间隙大小变化对测量精度的影响具有规律,可以建模进行修正。实验所用的84对级的寄生式时栅角最佳安装间隙大小为0.2 mm,对于针对不同测量对象的不同寄生式时栅可以利用该方法进行确定最佳安装间隙。测头的俯仰角、偏摆角的变化对测量精度的影响规律变化较复杂,本文建立了俯仰角、偏摆角引起的时栅行波信号过零位误差补偿模型,可以用于指导传感器的误差修正,提高传感器测量精度。本文的研究结果可以用于指导传感器的结构优化设计、测头的安装和误差补偿。

## 参考文献:

- [1] 中国机械工业联合会科技工作部.“十五”我国数控技术及装备发展情况[J]. 中国制造业信息化,2005,34(3):40-43.  
Science and technology department of the China Machinery Industry Federation. The development of China numerical control technology and equipments during the 15th plan [J]. *Manufacture Information Engineering of China*, 2005, 34(3): 40-43. (in Chinese)
- [2] 林玉池. 测量控制与仪器仪表前沿技术及发展趋势[M]. 天津:天津大学出版社,2008.  
LIN Y CH. *The Frontier Techniques and Development Trends of Measurements & Controls and Instrumentation* [M]. Tianjin: Tianjin University Press,2008. (in Chinese)
- [3] 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,2010,10(24):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*,2010,10(24):40-45. (in Chinese)
- [4] 彭东林,李彦,付闯,等. 用于极端和特殊条件下机械传动误差检测的寄生式时栅研究[J]. 仪器仪表学报,2013,34(2):359-364.  
PENG D L, LI Y, FU M, et al.. Study on parasitic time grating sensors used for mechanical transmis-
- sion error measurement under harsh and special environment [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2013,34(2):359-364. (in Chinese)
- [5] 彭东林,刘小康,张兴红,等. 高精度时栅位移传感器研究[J]. 机械工程学报,2005,42(12):126-129.  
PENG D L, LIU X K, ZHANG X H, et al.. Research on high precision Time-grating displacement sensor [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005,42(12):126-129. (in Chinese)
- [6] 彭东林,汤其富,陈锡侯,等. 变耦合系数型时栅位移传感器后期处理新方法[J]. 仪器仪表学报,2012,33(12):28-30.  
PENG D L, TANG Q F, CHEN X H, et al.. New Method of Post processing in Time-grating with Variable Coupling Coefficient [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(12):28-30. (in Chinese)
- [7] 彭东林,陈锡侯,朱革,等. 时栅的波动方程分析与行波形成新方法[J]. 机械工程学报,2006,42(11):39-43.  
PENG D L, CHEN X H, ZHU G, et al.. Analysis of fluctuation function in Time-grating and new method production traveling wave [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*,2006,42(11):39-43. (in Chinese)
- [8] 武亮,陈锡侯,王阳阳,等. 磁导调制型时栅位移传感器测量方法研究[J]. 传感技术学报,2014,27(8):1043-1048.  
WU L, CHEN X H, WANG Y Y, et al.. Research on the measurement method for time grating sensor

- based on permeability modulation [J]. *Chinese Journal of Sensors and actuators*, 2014, 27 (8): 1043-1048. (in Chinese)
- [9] 孙世政, 彭东林, 付敏, 等. 提高嵌入式时栅传感器精度的测头设计方法[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36 (1): 26-31.  
SUN S Z, PENG D L, *et al.*. Probe design method for improving the precision of embedded time grating sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(1): 26-31. (in Chinese)
- [10] 孙世政, 彭东林, 武亮, 等. 时栅动态测量误差建模与补偿技术研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 23(4): 1114-1121.  
SUN S Z, PENG D L, WU L, TANG Q F, *et al.*. Research on modeling and compensation technology for time-grating sensor's dynamic measurement errors[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 23(4): 1114-1121. (in Chinese)
- [11] 高忠华, 陈锡候, 彭东林, 等. 时栅传感器动态自动测试与标定系统[J]. *仪表技术与传感器*, 2010, 2 (2): 95-97.  
GAO Z H, CHEN X H, PENG D L, *et al.*. Dynamic automatic testing and calibration system of time grating sensor [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2010, 2(2): 95-97. (in Chinese)
- [12] WATANABE T, FUJIMOTO H, NAKAYAMA K *et al.* Automatic high precision calibration system for angle en-coder[C]. *Lasers in Metrology and Art Conseruation. International Society for Optics and Photonics*, 2001: 267-274.
- [13] WATANABE T, FUJIMOTO H, MASUDA T. Self-cali-bratable rotary encoder[C]. *7th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments*, 2005, 13 (1): 240-245.
- [14] 赵博, 张洪亮. Ansoft12 在工程电磁场中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.  
ZHAO B, ZHANG H L. *Application of Ansoft12 in engineering electromagnetic field* [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydro power Press, 2010. (in Chinese)

#### 作者简介:



杨洪涛(1972—),男,福建莆田人,教授、硕士生导师,1993年、2001年于安徽理工大学分别获得学士、硕士学位,2007年于合肥工业大学获得博士学位,主要研究方向为精密测试技术、现代精度理论及应用。E-mail: lloid@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)