

文章编号 1004-924X(2017)09-2339-08

## 多读数头混合布局测角误差抑制方法

张文颖<sup>1</sup>, 劳达宝<sup>2</sup>, 周维虎<sup>1,2,3\*</sup>, 江 炜<sup>2,3</sup>, 朱浩然<sup>1</sup>

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 中国科学院 光电研究院, 北京 100094;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:**在不增大码盘尺寸的前提下,对测角传感器读数头的布局展开研究,以研制小型化高精度的测角传感器。本文基于测角误差的谐波分析结果,详细推导和分析了多读数头布局对角度测量误差的抑制原理。通过对几种典型多读数头布局方式进行深入研究,提出一种采用奇数头和偶数头相结合的读数头混合布局方式,以消除更多更高阶次误差,提高测角传感器的精度。实验结果表明,当采用三个、四个和六个读数头均匀布局形式时,测角传感器的测角精度分别为15.44"、9.72"和8.96";当采用六个读数头优化布局的方式时,测角精度可达到7.7"。上述结果说明多读数头优化布局可有效抑制测角误差,提高测量精度。

**关键词:**角度测量误差;测角传感器;多读数头;谐波分析;布局方式

**中图分类号:**TH721 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172509.2339

## Suppression method for angle measurement error of mixing-layout multiple reading head

ZHANG Wen-ying<sup>1</sup>, LAO Da-bao<sup>2</sup>, ZHOU Wei-hu<sup>1,2,3\*</sup>, JIANG Wei<sup>2,3</sup>, ZHU Hao-ran<sup>1</sup>

(1. *Institute of Photoelectric Engineering,*

*Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;*

2. *Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

4. *School of Electronics and Information Engineering,*

*Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: zhouweihu@aoe.ac.cn*

**Abstract:** Under the premise of not increasing size of code, layout form for reading head of angle measurement sensor was researched to develop high-precision angle measurement sensor with miniaturization. Through harmonic analysis for angle measurement error, the suppression principle of layout for multiple reading head to angle measurement error was deducted and analyzed in detail. On the basis of intensive study on various typical layout modes for multiple reading head, a mixed layout method for reading

收稿日期:2017-02-09;修订日期:2017-04-17.

基金项目:国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(No. 2016YFF0100700);青岛市光电智库联合基金资助项目(No. GDZK-2017-05)

head combined with odd-number head and even-number head was proposed to eliminate more and higher order errors and improve accuracy of angle measurement sensor. The experiment result shows that at the time of adopting layout form for uniform distribution of three, four and six reading heads, angle measurement accuracies of angle measurement sensor are respectively  $15.44''$ ,  $9.72''$  and  $8.96''$ ; when adopting optimized layout form of six reading heads, angle measurement accuracy can reach  $7.7''$ . Thus it can be concluded that optimized layout for multiple reading head can effectively restrain angle measurement error and improve measurement accuracy.

**Key words:** angle measurement error; angle measurement sensor; multiple reading head; harmonic analysis; layout form

## 1 引言

测角传感器是国防装备、航天航空、先进制造、测试计量和精密仪器等领域的关键功能部件,在军民两用工业和国民经济建设中具有广泛应用。随着“中国制造 2025”战略规划的实施,先进制造和测试计量等领域对测角传感器的小型化和高精度提出了更迫切的需求。

增加码盘的刻线数与误差补偿是提高测角传感器精度的主要方法。随着码盘刻线数量的增多,码盘的制作难度也会随之增加,尤其对于绝对式编码器,增加刻线将使码盘的直径变大,进而限制其轻便化、集成化和小型化的实现;对于旋转设备,体积大重量大将产生功耗大、可靠性差、便携性差、成本高等问题。这些都将严重影响系统性能和产品质量。误差补偿方法通常包括两步:在硬件方面,采用多个读数头的不同布局读取误差值,后续再利用软件进行误差补偿实现。国内外学者已对误差补偿方法进行了大量研究,并取得了许多成果。Johannes Heidenhain 公司提出了一种双读数头对径读数方法,可以有效去除安装偏心,但对读数头的安装要求非常严格。Watanabe 等为了实现角度编码器的自标定,研究出一种在码盘圆周均匀布置五个读数头的方法,但其自标定精度受限于读数头安装状态的一致性<sup>[1]</sup>。PTB (The Physikalisch-Technische Bundesanstalt)提出了一种将八对读数头以 $2\pi/2r$  ( $r=0,1,2,\dots,7$ )为间隔,非均匀地分布于圆周上的布局方式,采用最小二乘法获得系统误差,从而对传感器进行标定。但该方法需要不同读数头在同一位置的测量误差要保证一致<sup>[2-3]</sup>。上述这些

误差补偿方法大多只能消除部分系统误差。另外,由于安装传感器的转台性能不同,或使用过程中性能发生改变,致使补偿效果非常有限<sup>[4]</sup>。

本文详细推导和分析了多头读数布局对角度测量误差的抑制原理;针对几种典型多读数头布局方式进行了深入分析和实验;提出了一种采用奇数头和偶数头相结合的读数头混合布局方式,以抑制更多更高阶次误差,可在线实时抑制测角误差,为研制更高精度测角传感器提供了理论基础。

## 2 圆光栅测角原理

光栅环(标尺光栅)与读数头(指示光栅和读数电路)共同构成了圆光栅测角传感器,如图 1 所示。标尺光栅和指示光栅相干涉产生莫尔条纹,如图 2 所示。由图 2 可知,当标尺光栅相对指示光栅转动时,莫尔条纹会发生移动,通过莫尔条纹的移动量就可以计算出标尺光栅相对于指示光栅移动的距离,进而算出转动的角度<sup>[5]</sup>。

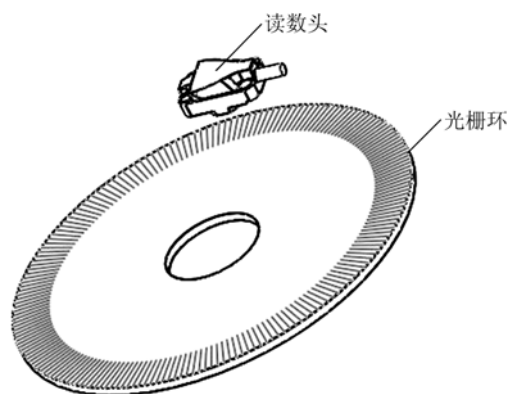


图 1 测角传感器组成

Fig. 1 Composition of angle measurement sensor

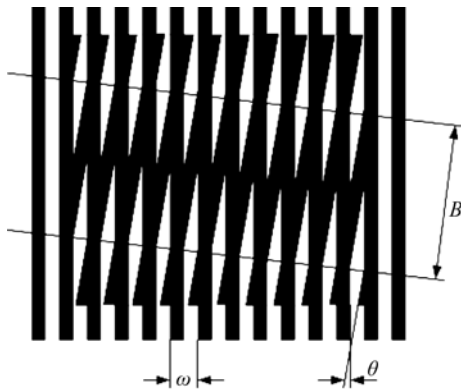


图 2 莫尔条纹图形

Fig. 2 Moire fringe pattern

一般情形下,栅线角较小,则栅线角  $\theta$ 、光栅栅距  $\omega$  与莫尔条纹宽度  $B$  间满足以下关系:

$$B = \frac{\omega}{\theta}. \quad (1)$$

当光栅移动一个栅距  $\omega$  时,莫尔条纹移动一个条纹宽度  $B$ ,因此,通过莫尔条纹移动的数目  $N$  可计算出光栅移动的距离  $s$ :

$$s = N \cdot \omega = N \cdot B\theta. \quad (2)$$

令光栅的半径为  $r$ ,则光栅转过的角度  $\beta$  表达式为:

$$\beta = s/r = N \cdot B\theta/r. \quad (3)$$

### 3 测角误差分析

测角系统主要包括轴系、读数头和光栅,如图 3 所示。

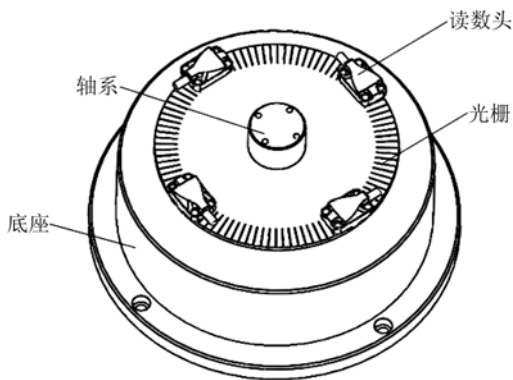


图 3 测角系统示意图

Fig. 3 Schematic of angle measurement system

通常,影响测角系统精度的因素主要有轴系晃动误差、由光栅自身引入的刻划误差、读数头的

电子细分误差和安装误差等<sup>[6]</sup>。栅线的实际刻划位置与理想刻划位置之差即为刻划误差。电子细分误差是读数头由于直流电平漂移、信号非正交等因素导致的误差<sup>[7]</sup>。测角传感器的安装误差主要包括安装偏心与倾斜<sup>[8]</sup>。产生偏心误差的原因是装配间隙等引起的圆光栅几何中心和装配后的旋转中心不重叠<sup>[9]</sup>。如图 4 所示,以  $O$  为圆光栅的圆心,建立坐标系  $xOy$ 。当存在安装偏心时,光栅的圆心更改为  $O'$ ,再以  $O'$  为圆心,建立坐标系  $x'O'y'$ 。点  $P'$  为存在偏心时圆光栅上任意一点,若此刻圆光栅在理想状态下转过的角度为  $\angle xOy$ ,而存在偏心时,实际转过角度为  $\angle x'O'y'$ 。若点  $P'$  处的测角误差是  $-\delta$ ,则当取  $x$  轴的正向为角度零位时,误差修正值为  $\delta$ 。令  $OP' = b$ ,偏心量  $OO' = a$ ,圆光栅半径  $O'P' = r$ ,由图 4 可知:  $\overrightarrow{OP'} = \overrightarrow{OO'} + \overrightarrow{O'P'}$  即:

$$be^{j90^\circ} = ae^{j\beta} + re^{j\gamma}, \quad (4)$$

式中:  $\gamma = 90^\circ - \delta, 0^\circ < \gamma < 180^\circ, -90^\circ < \delta < 90^\circ$ 。

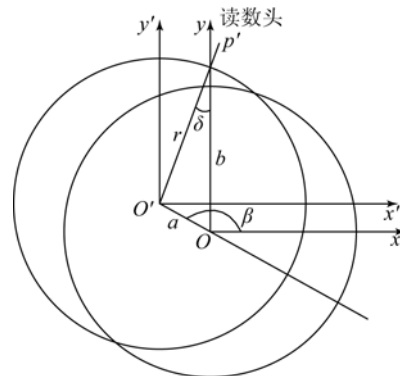


图 4 安装偏心示意图

Fig. 4 Mounting eccentric diagram

求解式(4)可得:

$$\delta = -\arcsin \frac{a \cos \beta}{r}. \quad (5)$$

圆光栅的安装倾斜示意图如图 5 所示。

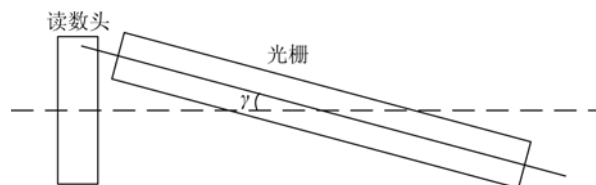


图 5 安装倾斜示意图

Fig. 5 Installation tilt diagram

令光栅环相对读数头所在平面的倾斜角为  $\gamma$ ,光栅半径为  $r$ ,那么光栅在旋转过程中引起的

莫尔条纹移动的最大值为:

$$\Delta B = \pm r \sin \gamma. \quad (6)$$

则莫尔条纹移动数为:

$$\Delta N = \frac{\Delta B}{B} = \pm r \sin \gamma / B. \quad (7)$$

将式(7)带入式(3),得到安装倾斜导致的角度误差为:

$$\Delta \beta = \pm \frac{r \sin \gamma}{B} \cdot \frac{B \theta}{r} = \pm \theta \sin \gamma. \quad (8)$$

轴系晃动主要包括轴系的径向跳动和轴系倾斜。轴系的径向跳动与光栅环安装偏心的影响效果类似;轴系倾斜可使固定于轴系上的光栅环产生倾斜,其对测量精度的影响与光栅环的安装倾斜效果类似。

$$\Delta \theta_{\Sigma} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^m \frac{e_k}{R} \left\{ \sin k\theta + \sin k \left[ \theta + \frac{2\pi}{n} \right] + \sin k \left[ \theta + 2 \cdot \frac{2\pi}{n} \right] + \dots + \sin k \left[ \theta + (n-1) \cdot \frac{2\pi}{n} \right] \right\}. \quad (10)$$

对于  $k$  阶谐波来说,式(10)可以表示为:

$$\Delta \theta_k = \frac{1}{n} \cdot \frac{e_k}{R} \left\{ \sin k\theta + \sin k \left[ \theta + \frac{2\pi}{n} \right] + \sin k \left[ \theta + 2 \cdot \frac{2\pi}{n} \right] + \dots + \sin k \left[ \theta + (n-1) \cdot \frac{2\pi}{n} \right] \right\}. \quad (11)$$

将式(11)展开可以得到:

$$\Delta \theta_k = \frac{1}{n} \cdot \frac{e_k}{R} \left\{ \begin{aligned} & \sin k\theta \left[ 1 + \cos k \cdot \frac{2\pi}{n} + \cos k \cdot 2 \cdot \frac{2\pi}{n} + \dots + \cos k \cdot (n-1) \cdot \frac{2\pi}{n} \right] + \\ & \cos k\theta \left[ \sin k \cdot \frac{2\pi}{n} + \sin k \cdot 2 \cdot \frac{2\pi}{n} + \dots + \cos k \cdot (n-1) \cdot \frac{2\pi}{n} \right] \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

由三角函数之间的变换关系可知:

$$1 + \cos k \cdot \frac{2\pi}{n} + \cos k \cdot 2 \cdot \frac{2\pi}{n} + \dots + \cos k \cdot (n-1) \cdot \frac{2\pi}{n} = \frac{\cos \left[ \frac{n-1}{2} \cdot k \cdot \frac{2\pi}{n} \right] \sin \left[ \frac{n}{2} \cdot k \cdot \frac{2\pi}{n} \right]}{\sin \left[ k \cdot \frac{2\pi}{n} \right]}. \quad (13)$$

$$\sin k \cdot \frac{2\pi}{n} + \sin k \cdot 2 \cdot \frac{2\pi}{n} + \dots + \cos k \cdot (n-1) \cdot \frac{2\pi}{n} = \frac{\sin \left[ \frac{n-1}{2} \cdot k \cdot \frac{2\pi}{n} \right] \sin \left[ \frac{n}{2} \cdot k \cdot \frac{2\pi}{n} \right]}{\sin \left[ k \cdot \frac{2\pi}{n} \right]}. \quad (14)$$

将式(13)、(14)带入式(12)可以得到:

$$\Delta \theta_k = \frac{1}{n} \cdot \frac{e_k}{R} \left\{ \sin k\theta \cdot \frac{\cos \left[ k\pi - (k/n)\pi \right] \sin k\pi}{\sin(k/n)\pi} + \cos k\theta \cdot \frac{\sin \left[ k\pi - (k/n)\pi \right] \sin k\pi}{\sin(k/n)\pi} \right\}. \quad (15)$$

因为谐波的阶次  $k$  为整数,所以式(15)右边的第二项为零,则式(15)可以写成:

$$\Delta \theta_k = \frac{1}{n} \cdot \frac{e_k}{R} \left\{ (-1)^k \sin kn \cdot \frac{\cos(k/n)\pi \cdot \sin k\pi}{\sin(k/n)\pi} \right\}. \quad (16)$$

当  $k = cn$  时( $c$  为正整数),式(16)中:

$$\left| \frac{\cos(k/n)\pi \cdot \sin k\pi}{\sin(k/n)\pi} \right| = n, \quad (17)$$

因此可以得到:

$$|\Delta \theta_k|_{\max} = \frac{1}{n} \cdot \frac{e_k}{R} \cdot n = \frac{e_k}{R}. \quad (18)$$

## 4 多读数头布局误差机理

针对安装偏心、刻划误差和轴系误差等对测角传感器精度的影响,可利用多读数头的平均读数,抑制测角误差<sup>[10]</sup>,提高测量精度。

在光栅周围均匀布置  $n$  个读数头,由于光栅的测角误差是以  $2\pi$  为周期的周期函数,因此可由各阶谐波误差合成读数头的读数误差,即:

$$\Delta \theta_{\Sigma} = \sum_{k=1}^m \frac{e_k}{R} \sin k\theta. \quad (9)$$

其中: $k$  是谐波阶次, $e_k$  是谐波幅值。所以,令读数取  $n$  个读数头读数的平均值时,读数误差为:

当  $k \neq cn$  时,式(16)中:

$$\frac{\cos(k/n)\pi \cdot \sin k\pi}{\sin(k/n)\pi} = 0, \quad (19)$$

因此, $\Delta \theta_k = 0$ 。

由以上分析可以得出如下结论:假如在光栅周围均匀分布  $n$  个读数头,计算这  $n$  个头读数的平均读数值,并将其作为最终的读数值时,则能够去除  $k = cn$  以外的所有谐波对读数精度的影响。由此可知,在圆光栅周围均匀分布两个读数头时,并取其读数的平均值作为读数值时,能够去除全部奇次谐波误差的影响;采用四头均布读数时,能

够去除除四的整数倍以外的所有谐波对读数精度的影响,采用更多的读数头可进一步对其误差进行补偿。然而,在码盘大小确定的情况下,受码盘直径与读数头尺寸的限制,不能无限地增加读数头的数量,否则将导致测角系统成本增加,结构复杂。

### 5 多读数头优化布局

通过分析利用多读数头结构消除误差的原理,提出一种采用奇数头和偶数头相结合的读数头混合布局方式。首先,在光栅周围均匀分布 3 个读数头,即  $n=3$ ,具体为图 6 中的 1、3、5。此时,其读数的平均误差可用下式表示:

$$\Delta\theta_k^{n=3} = \frac{1}{3} \cdot \frac{e_k}{R} \left\{ (-1)^k \sin k\theta \cdot \frac{\cos(k/3)\pi \sin k\pi}{\sin(k/3)\pi} \right\}. \quad (20)$$

当谐波阶次  $k \neq 3c$  时,  $\Delta\theta_k^{n=3} = 0$ 。这样采用三个读数头就能够有效去除三阶整数倍以外的所有谐波误差。

其次,在光栅周围均匀分布四个读数头,即  $n=4$  时,具体为图 6 中读数头 1、2、4、6,其中读数头  $n=6$  时,平均读数误差为:

$$\Delta\theta_k^{n=6} = \Delta\theta_k^{n=3} \cdot \Delta\theta_k^{n=4} = \frac{1}{12} \left\{ \left( \frac{e_k}{R} \right) (-1)^k \sin k\theta \right\}^2 \cdot \left\{ \frac{\cos(k/3)\pi \sin k\pi}{\sin(k/3)\pi} \cdot \frac{\cos(k/4)\pi \sin k\pi}{\sin(k/4)\pi} \right\}. \quad (22)$$

当谐波阶次  $k \neq 12c$  时,  $\Delta\theta_k^{n=6} = 0$ 。证实了采用如图 6 所示奇数头和偶数头相结合的六个读数头布局时,可以有效去除十二阶整数倍以外的谐波误差,图 7 为原理示意图。

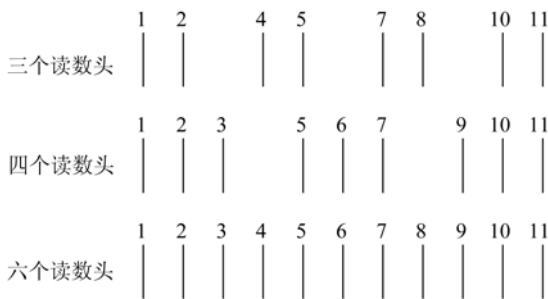


图 7 不同读数头时谐波误差消除示意图

Fig. 7 Harmonic error eliminated by different reading heads

这样采用较少的读数头便可实现更多更高阶谐波误差的消除,显著地提升了圆光栅的测角精度。此方法与传统的读数头布置方式相比,结构简单、体积小、易于调节、使用方便、成本低廉,具有显著的经济效应。

头 1 是共用的。此时,其读数的平均误差可用下式表示:

$$\Delta\theta_k^{n=4} = \frac{1}{4} \cdot \frac{e_k}{R} \left\{ (-1)^k \sin k\theta \cdot \frac{\cos(k/4)\pi \sin k\pi}{\sin(k/4)\pi} \right\}. \quad (21)$$

当谐波阶次  $k \neq 4c$  时,  $\Delta\theta_k^{n=4} = 0$ 。这样采用四个读数头能够有效地去除四阶整数倍以外的所有谐波误差。

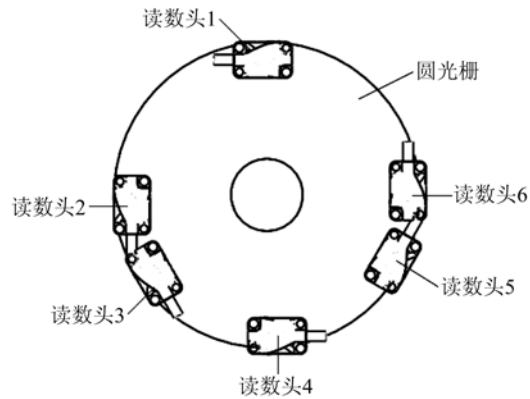


图 6 多读数头优化布局示意图

Fig. 6 Optimized layout diagram of multiple reading head

### 6 实验

#### 6.1 读数头均匀分布实验

实验中测角系统选用 MicroE 的 R10851-HD 圆光栅和 6 个 M3000 编码器。测试仪器包括多面棱体及自准直仪<sup>[11]</sup>。多面棱体选用二等 36 面棱体,精度约为  $\pm 1''$ 。自准直仪选用 CSZ-1A 型 CCD 双轴自准直仪,有效分辨率为  $0.01''$ ,显示误差为  $\pm 0.5''$ ,经过校准后精度优于  $\pm 0.1''$ 。安装读数头时,要确保光栅旋转一周,细分盒上的指示灯显示正常。多头读数实验如图 8 所示。

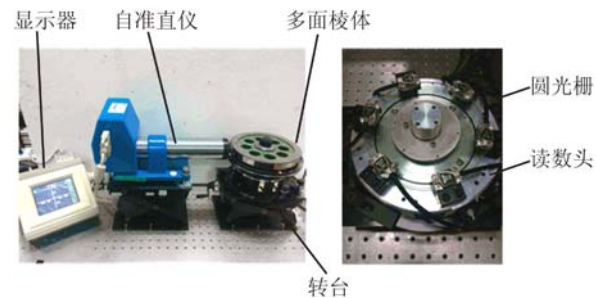


图 8 测角实验装置

Fig. 8 Angle measurement experiment device

利用自准直仪结合多面棱体进行测角误差标定时<sup>[12]</sup>,先记录圆光栅的测量值  $\alpha_1$  及自准直仪的初始值  $\beta_1$ ,再转动轴系的转轴至棱体的下一个工作面(垂直于自准直仪),记录圆光栅的测量值  $\alpha_2$  和自准直仪示值  $\beta_2$ 。依此类推,令圆光栅绕转轴旋转,直至转过棱体的全部工作面。

因此,圆光栅各个测量点的误差值可表示为:

$$e_i = (\alpha_i - \alpha_1) - (n_i - n_1) - (\beta_i - \beta_1), \quad (23)$$

式中:  $n_i$  为棱体第  $i$  面和第 1 面的实际工作角(包含工作角偏差);  $e_i$  是圆光栅第  $i$  个测量点处的测角误差。

图 9、图 10 是分别采用一个读数头、三个读数头、四个读数头和六个读数头,结合 36 面棱体与自准直仪标定的测角误差曲线。

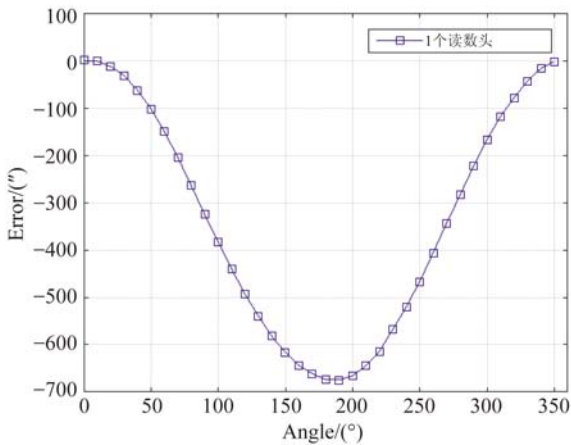


图 9 一个读数头误差曲线

Fig. 9 Error curve of one reading head

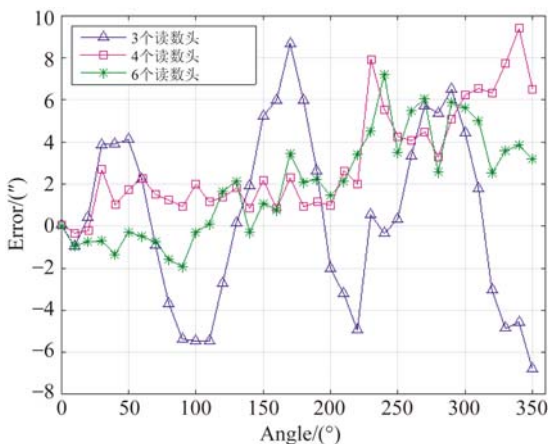


图 10 三、四、六个读数头误差曲线

Fig. 10 Error curves of three, four and six reading heads

由图 9 可知,在  $0^\circ \sim 360^\circ$  测量范围内,当采用一个读数头时,测角误差为  $674.61''$ 。由图 10 可知,当采用 3 个读数头时,测角误差为  $15.44''$ ,采用 4 个读数头时测角误差为  $9.72''$ ,采用六个读数头时测角误差为  $8.96''$ 。由以上结果可知,采用多个读数头均匀分布的布局形式能够抑制测角误差,并且,读数头数量越多,抑制误差的能力就越强。但是,由于受到码盘尺寸和成本的限制,不能无限地通过增加读数头的个数减小精度。当读数头的个数达到一定数量时,再增加一个头或一些头所起的抑制作用就不明显<sup>[13]</sup>。

### 6.2 读数头优化布局实验

利用与多读数头均匀分布实验相同的转台、圆光栅和六个读数头,按优化局部方式放置读数头,如图 11 所示。再结合多面棱体与自准直仪来标定圆光栅的测角误差。

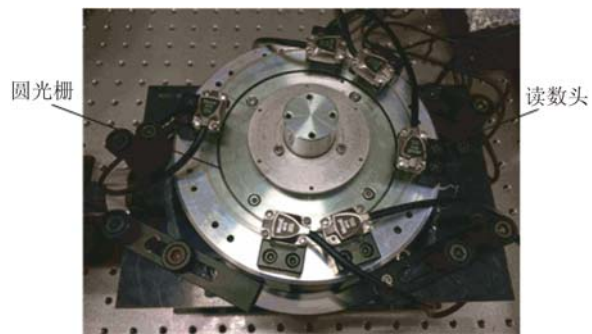


图 11 优化布局实验装置

Fig. 11 Experiment device with optimized layout

六个读数头的输出结果可表示为:

$$M = \frac{1}{2} \times \left( \frac{A_1 + A_2 + A_3 + A_4}{4} + \frac{A_1 + A_5 + A_6}{3} \right), \quad (24)$$

其中:  $A_i (i=1, 2, 3 \dots 6)$  是各个读数头的角度测量值,  $M$  是六个读数头非均匀分布时的输出角度值,图 12 为优化布局与 6 个读数头均匀分布误差曲线对比图。

由图 12 可知,在  $0^\circ \sim 360^\circ$  测量范围内,采用读数头优化布局方式,误差的峰峰值为  $-2.23''$  和  $5.47''$ ,测角误差为  $7.7''$ 。在不增加读数头个数、不增大码盘尺寸的情况下,通过采用奇数读数头与偶数读数头相结合的非均匀布局方式,可有效减小误差,提高测量精度。

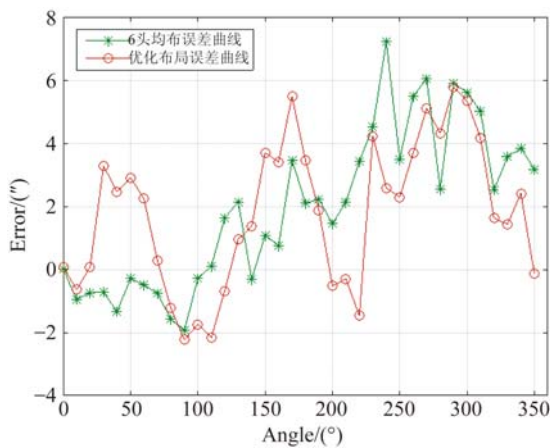


图12 六读数头优化布局与均匀分布两种方式下的误差曲线对比图

Fig. 12 Comparison of error curves for six reading heads in optimized layout and in uniform distribution

### 6.3 误差分析

在进行多读数头均匀分布和优化布局实验时,选取 MicroE 的 R10851-HD 圆光栅进行实验,光栅栅距为  $20\ \mu\text{m}$ ,有效直径为  $104.3\ \text{mm}$ 。刻划误差为  $2''$ ,读数头电子细分误差为  $0.5''$ ,其相对于测角误差较小。由于读数头安装时,光栅旋转一周后,细分盒上的指示灯显示正常,这说明读数头的安装误差小于  $\pm 0.08\ \text{mm}$ 。测量过程中测得圆光栅中心与选装轴系的偏心量为  $a = 7\ \mu\text{m}$ ,由式(5)可知,当  $\cos \beta = \pm 1$  时,偏心误差最大:

$$\delta_{\max} = -\arcsin \frac{\pm a}{r} = \mp 27.68''.$$

由此可知,偏心导致的角度测量误差较明显。由于角分辨率为  $0.077''$ ;莫尔条纹间距为  $B = 0.15\ \text{mm}$ ,由式(3)可计算得到  $\theta = 26.84''$ 。光栅在安装、轴系旋转过程中的倾斜量为  $6\ \mu\text{m}$ ,所以光栅环的倾斜角为  $0.414''$ ,带入式(8),可得安装倾斜误差为  $\Delta\beta = \pm 0.194''$ 。

### 参考文献:

- [1] WATANABE T, FUJIMOTO, NAKAYAMAK, *et al.*. Automatic high precision calibration system for angle encoder [C]. *Recent Developments in Traceable Dimensional Measurement, Munich, Germany, 2003*: 400-409.
- [2] PROBST R. Self-calibration of divided circles on

由多头读数实验可知,在  $0^\circ \sim 360^\circ$  测量范围内,当采用 3 个读数头时,能够去除 3 的整数倍阶谐波以外的所有谐波对读数误差的影响,实验测得的测角误差为  $15.44''$ ,相比于采用一个读数头,测角误差明显减小了。采用对径布局形式可抑制偏心误差,当 4 个读数头均匀分布于圆周上时,能够去除 4 的整数倍阶谐波以外的所有谐波对读数误差的影响,实验测得的测角误差为  $9.72''$ 。当 6 个读数头均匀分布于圆周上时,能够去除 6 的整数倍阶谐波以外的所有谐波对读数误差的影响,实验测得的测角误差为  $8.96''$ ,所以采用多个读数头布局可抑制测角误差。但是,读数头的增加会增加成本和码盘的尺寸;而随着读数头数量的增多,对测角误差的抑制能力减弱。在此基础上,本文对读数头布局形式进行了优化,提出一种采用奇数头和偶数头相结合的读数头混合布局方式,可抑制更高阶次误差。通过实验可知,使用与均匀布局相同的实验设备,采用优化布局时的测角误差为  $7.7''$ ,测角误差得以有效抑制,测量精度得以提高。

## 7 结论

本文详细推导和分析了多头读数布局对角度测量误差的抑制原理,针对几种典型多读数头布局方式进行了深入分析,并搭建了实验系统;提出了一种优化的布局方式,并进行了实验验证。通过系统分析,明确了多头读数布局对测角误差抑制的机理。实验结果显示:采用一个读数头时的误差为  $674.61''$ ,采用三、四、六个读数头时的误差分别为  $15.44''$ 、 $9.72''$  和  $8.96''$ ;采用优化布局方式的测角误差为  $7.7''$ 。实验结果证明,采用优化布局方式能有效抑制测角误差,提高测量精度效果明显。

the basis of prime factor algorithm [J]. *Measurement Science and Technology*, 2008,19(1):1-11.

- [3] RALF D G, ANDREAS F, CLEMENS E. Calibration of angle encoders using transfer functions [J]. *Meas. Sci. Technology*, 2006,17,2811-2818.

- [4] 吴一龙,万红进. 一种基于坐标变换的测角误差校正算法[J]. *电子科技*, 2016,29(9):45-47+51.

WU Y L, WAN H J. A calibration algorithm of an-

- gle measuring error based on coordinate transformation [J]. *Electronic Sci. & Tech.*, 2016, 29(9):45-47+51. (in Chinese)
- [5] 赵人杰, 马文礼. 利用误差谐波补偿法提高金属圆光栅测角精度[J]. 仪器仪表用户, 2009, 116(3):69-71. ZHAO R J, MA W L. Improving the accuracy of new-type encoders using error harmonic compensation [J]. *Electronic Instrumentation Customer*, 2009, 116(3):69-71. (in Chinese)
- [6] 艾晨光, 褚明, 孙汉旭, 等. 基准圆光栅偏心检测及测角误差补偿[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11):2479-2484. AI CH G, CHU M, SUN H X, *et al.*. Eccentric testing of benchmark circular grating and compensation of angular error [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11):2479-2484. (in Chinese)
- [7] 王显军. 大型望远镜测角系统误差的修正[J]. 光学精密工程, 2015, 23(9):2446-2451. WANG X J. Correction of angle measuring errors for large telescopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9):2446-2451. (in Chinese)
- [8] 高贯斌, 王文, 林铿, 等. 圆光栅角度传感器的误差补偿及参数辨识[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8):1766-1772. GAO G B, WANG W, LIN K, *et al.*. Error compensation and parameter identification of circular grating angle sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8):1766-1772. (in Chinese)
- [9] 杨琪, 施志勇. 一种双旋转变压器测角系统设计[J]. 现代雷达, 2015, 37(1):59-62. YANG Q, SHI ZH Y. Design of an double resolver angle measuring system [J]. *Modern Radar*, 2015, 37(1):59-62. (in Chinese)
- [10] ORTON P A, POLIAKOFF J F, HATIRIS E, *et al.*. Automatic self-calibration of an incremental motion encoder [C]. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Budapest, Hungary*, 2001:1614-1618.
- [11] 李海霞, 张嵘, 韩丰田. 感应同步器测角系统误差测试及补偿[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(6):611-616. LI H X, ZHANG R, HAN F T. Error testing and compensation of an inductosyn-based angular measurement system [J]. *J Tsinghua Univ(Sci&Technol)*, 2016, 56(6):611-616. (in Chinese)
- [12] 孙方金. 自准直仪与反光面准直时的注意事项[J]. 计量技术, 1999(10):33-36. SUN F J. Points for attention in collimating of autocollimator and reflector [J]. *Measurement Technique*, 1999(10):33-36. (in Chinese)
- [13] 邹自强. 论圆光栅多头读数系统[J]. 光学机械, 1983(2):39-48. ZOU Z Q. The dissertation about many-headed circular grating system [J]. *Optical Machinery*, 1983(2):39-48. (in Chinese)

#### 作者简介:



张文颖(1988—),女,吉林松原人,博士研究生,2012年、2015年于长春理工大学分别获得学士、硕士学位,主要研究方向为光电测量与精密仪器。E-mail:zwzywy8866@163.com

#### 导师简介:



周维虎(1962—),男,安徽合肥人,博士,研究员,博士生导师,2000年于合肥工业大学获得博士学位,主要研究方向为光电系统总体设计与集成测试、飞秒激光测量、光电精密测量与大尺寸几何量计量测试技术。E-mail:zhouweihu@aoe.ac.cn

(本栏目编辑:曹 金)