

激光与光电子学进展

立体光栅测角传感器系统研究

张文颖^{1,2}, 朱浩然^{3*}, 李楠^{1,2}

¹吉林工程技术师范学院量子信息技术交叉学科研究院, 吉林 长春 130052;

²吉林省量子信息技术工程实验室, 吉林 长春 130052;

³长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022

摘要 为了解决测角传感器精度和径向尺寸之间难以调和的矛盾,从辐通量和莫尔条纹的角度,详细推导和分析了端面光栅轴系误差和柱面光栅轴系误差,并建立了误差模型。基于轴系误差分析,设计了一款结合端面光栅和柱面光栅的立体光栅测角传感器,并搭建了立体光栅测角传感器实验系统。实验结果表明,当读数头呈均匀分布时,立体光栅测角传感器的误差为 6.75";当读数头呈非均匀分布时,立体光栅测角传感器的误差为 4.33"。研究结果为轴系误差的抑制提供了新方法,为小型化、高精度测角传感器的研制提供了参考。

关键词 测量; 测角传感器; 轴系误差; 角度测量; 误差分析; 圆光栅

中图分类号 P204

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2312005

Research on Stereo Grating Angle Sensor System

Zhang Wenying^{1,2}, Zhu Haoran^{3*}, Li Nan^{1,2}

¹*Institute for Interdisciplinary Quantum Information Technology, Jilin Engineering Normal University, Changchun, Jilin 130052, China;*

²*Jilin Engineering Laboratory for Quantum Information Technology, Changchun, Jilin 130052, China;*

³*School of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract In order to solve the contradiction between accuracy and radial dimension of an angle sensor, this paper derives and analyzes the axial errors of an end grating and a cylindrical grating from the aspects of radial flux and Moire fringes in detail, and the error model is also established. Based on the axial error analysis, a stereo grating angle sensor combining an end grating with a cylindrical grating is designed and the corresponding experimental system of stereo grating angle sensor is established. The experimental results show that the error of the proposed stereo grating angle sensor is 6.75" when reading head presents a uniform distribution. In contrast, when reading head presents a non-uniform distribution, the error is 4.33". These results provide a new method for the suppression of axial errors and some references for the development of compact and high precision angle sensors.

Key words measurement; angle sensor; axial errors; angle measurement; error analysis; circular grating

OCIS codes 120.3930; 120.4640; 280.4788

收稿日期: 2021-03-29; 修回日期: 2021-05-10; 录用日期: 2021-07-13

基金项目: 吉林省教育厅项目(JJKH20200177KJ)、2020年吉林省预算内基本建设资金项目(2020C018-4)、2018年度博士科研启动经费项目(BSKJ201827)

通信作者: *zwyzwy8866@163.com

1 引言

角度测量是机械测试理论与技术的基本问题,高精度测角传感器是先进制造和测试计量领域中不可替代的核心关键部件。长期以来,测角传感器的精度和径向尺寸之间存在难以调和的矛盾,需要通过增大传感器的径向尺寸来提高测角精度。对于设备和仪器而言,尺寸和重量的增大特别是径向尺寸的增大,将对使用带来诸多不便。多头读数布局的方式是抑制角度测量误差的常用方法^[1],读数头的数量越多,传感器的精度就越高^[2]。在实施过程中,由于受到光栅盘尺寸的限制,不能无限制地增加读数头的个数^[3];并且增大光栅盘的尺寸会增加编码器的体积和重量,也就降低了旋转设备的可靠性和便携性^[4]。即便采用非对称布局方式,误差的抑制效果也受限于相邻两读数头的间距及主光栅和读数头的径向尺寸^[5]。为了解决测角传感器尺寸与精度之间的矛盾,HEIDENHAIN公司提出了光栅干涉扫描方法,测角精度小于0.5"。但这种方法需要极高的光学元件加工精度,目前只有HEIDENHAIN公司具有光栅干涉扫描式角度传感器的生产能力,成本极高。英国、瑞士等国使用超精密密珠轴系技术开发了具有极低径向跳动和轴向跳动的角度编码器轴系,如瑞士KUNZ公司研发的精密回转台的轴向跳动仅为20 nm,轴向跳动对角度测量精度的影响被降低到极低的水平,这种方法难以生产100 mm以下的小尺寸。

圆光栅编码器测角精度的提高大多是通过误差补偿模型来实现的。在光栅测角传感器误差抑制方面,德国研究者通过二维傅里叶变换与余数定理获得了系统误差,实现了角位移传感器的自补偿^[6]。日本研究者研发了自校准角度测量传感器,其可部分抑制回转轴径向跳动对测角精度的影响^[7]。英国研究者研制了动态测量仪,实现了角度测量和角度尺校准,但设备成本较高,结构复杂,较难在工程现场使用。中国研究者提出了一种基于等分平均原理的校准方法,测角精度为0.03"^[8]。然而,关于测角传感器轴系误差的抑制研究鲜有报道。

本文从辐通量和莫尔条纹的角度,详细推导和分析了端面光栅轴系回转误差和柱面光栅轴系回转误差,设计了一款自由组合的立体光栅测角传感器。搭建了由上端面光栅和柱面光栅组合的立体光栅测角传感器实验系统,进行了均匀分布测角实

验和非均匀分布测角实验,为抑制轴系误差、研制高精度小型化测角传感器提供了新思路。

2 轴系回转误差分析

测角传感器误差主要包括刻划误差、安装误差、电子细分误差和轴系回转误差^[9]。轴系回转误差是导致测角传感器误差的主要因素,其主要表现形式是轴系偏心和轴系倾斜^[10-11]。光栅主要分为在端面刻划栅线的端面光栅和在柱面刻划栅线的柱面光栅。为了提高测角精度,本文分析了轴系偏心和轴系倾斜下的端面光栅测角误差和柱面光栅测角误差。

2.1 偏心误差

偏心是指轴系回转过程中光栅环的中心与转轴运动中心不重合^[12-13]。由光学原理可知,单个光栅栅距内的辐通量 $\Phi_e(x')$ 与透光面积 $S(x')$ 成正比,其中 x' 为栅距个数。令光电接收元件的辐照度为 E_e ,在理想状态下,光电接收元件横向宽度内 n 个栅距的总辐通量为 Φ ,那么忽略暗电流因素,光生电流 I_ϕ 为

$$I_\phi = \frac{\eta q}{h\nu} [1 - \exp(-\alpha l)] \Phi, \quad (1)$$

式中: η 为光电材料的光电转换效率; q 为电子电荷量; $h\nu$ 为光子能量; α 为材料对辐射的吸收系数; l 为半导体厚度。光电接收元件输出电流与入射总辐通量存在线性关系。因此,光电编码器光电接收元件的输出电流 $I(x')$ 与 x' 间的关系为

$$I(x') = KS(\Delta x'), \quad (2)$$

$$K = \frac{\eta q}{h\nu} [1 - \exp(-\alpha l)] n E_e, \quad (3)$$

式中: K 为比例系数; n 为光电接收元件横向宽度内栅距的个数; $\Delta x'$ 为栅距的变化量。

由于编码器码盘安装时两块光栅无法完全重合,两光栅间会存在一个极小的夹角 θ 。图1所示为光栅运动示意图,其中 G_1 为固定不动的光栅, G_2 为随主轴旋转的光栅, d 为透光缝宽。一个栅距内的透光面积为

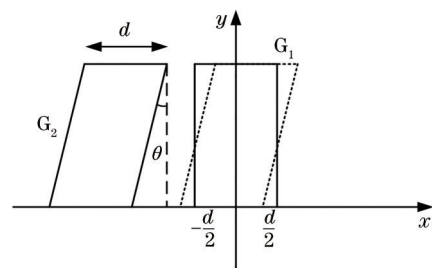


图1 光栅运动示意图

Fig. 1 Schematic of grating motion

$$S(x) = \begin{cases} \frac{1}{2 \tan \theta} (x^2 + dx + \frac{d^2}{4}), & -\frac{d}{2} \leq x \leq H \tan \theta - \frac{d}{2} \\ Hx + \frac{Hd}{2} - \frac{H^2}{2} \tan \theta, & H \tan \theta - \frac{d}{2} < x \leq \frac{d}{2} \\ -\frac{x^2}{\tan \theta} + (H + \frac{d}{\tan \theta})x - \frac{[(H \tan \theta + d/2)^2 + d^2/4]}{2 \tan \theta} + dH, & \frac{d}{2} < x \leq H \tan \theta + \frac{d}{2} \\ -Hx + \frac{3Hd}{2} + \frac{H^2}{2} \tan \theta, & H \tan \theta + \frac{d}{2} < x \leq \frac{3d}{2} \\ \frac{1}{2 \tan \theta} [x^2 - 2(3d/2 + H \tan \theta)x + (3d/2 + H \tan \theta)^2], & \frac{3d}{2} < x \leq \frac{3d}{2} + H \tan \theta \end{cases}, \quad (4)$$

式中： $H=1/(2p \cos \theta)$ ，其中 p 为 G_2 的长度； x 为 G_2 相对 G_1 在横轴方向上的移到距离。

当轴系发生微小偏心现象时，对于端面光栅，偏心量影响透光面积，进而影响光电接收元件输出的电流；对于柱面光栅，偏心量仅改变标尺光栅与指示光栅之间的距离，不会影响透光面积。

2.2 倾斜误差

轴系倾斜是导致测角误差中二阶误差的主要因素，其会引起莫尔条纹的宽度与数量同时发生改变。指示光栅的第 m 条刻线的位置^[14]可表示为

$$z = \cot(\alpha x) - \frac{m\omega}{\sin \alpha}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (5)$$

式中： α 是指示光栅与垂直轴之间的夹角； ω 是栅距。

当轴系不发生倾斜时，有

$$z = \frac{\omega \cdot (K - \frac{r \cdot \theta_0}{\omega})}{\alpha}, \quad (6)$$

式中： K 是莫尔条纹明暗变化的数量； r 为圆环半径； θ_0 为旋转的角度。

测得的角度大小为

$$\varphi_0 = K \frac{\omega}{r} = \frac{\alpha \cdot z}{r} + \omega \cdot \theta_0. \quad (7)$$

令轴系倾斜角为 γ ，对于端面光栅，相当于栅距发生了变化，则

$$\varphi' = K \cdot \frac{\omega \cdot \cos \gamma}{r} = \frac{\alpha \cdot z}{r} + \omega \cdot \cos \gamma \cdot \theta_0, \quad (8)$$

式中： φ' 为轴系倾斜时测得的角度值。

则引入的误差为

$$\Delta' = \varphi' - \varphi_0 = K \cdot \frac{\omega}{r} (\cos \gamma - 1) = \omega \cdot (\cos \gamma - 1) \cdot \theta_0. \quad (9)$$

当轴系发生倾斜时，对于柱面光栅，相当于指示光栅和 z 轴的夹角变化了 γ ，栅距及其他不受影响，有

$$\varphi'' = \frac{z}{r} \cdot (\alpha + \gamma) + \omega \cdot \theta_0. \quad (10)$$

引入的误差为

$$\Delta'' = \varphi'' - \varphi_0 = \frac{z}{r} \cdot \gamma = (\frac{\omega K}{ar} - \frac{\omega \theta_0}{\alpha}) \gamma. \quad (11)$$

3 立体光栅测角传感器模型

基于轴系回转误差的分析，设计了一款立体光栅测角传感器模型，如图 2 所示。圆光栅的上端面、下端面及柱面均可刻划栅线，根据实际需要确定实际栅线的刻划面。

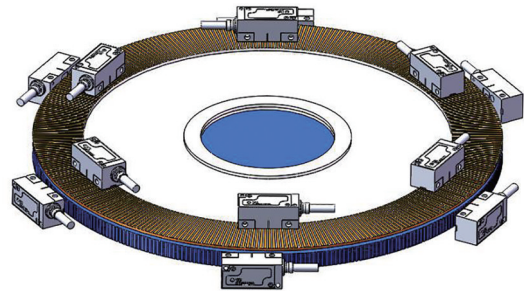


图 2 立体光栅测角传感器概念图

Fig. 2 Concept diagram of stereo grating angle sensor

通常测角传感器的读数头采用均匀分布或非均匀分布方式。采用非均匀分布的读数头布局方式，可在更少读数头下消除更高阶的谐波误差。但这种方式并不能降低对光栅尺寸的要求，因为布局中最小间距的两个读数头决定了所能消除的最高阶次，而由于尺寸的限制，在同一个光栅周围，两个读数头的间隔无法足够小。本文提出的立体光栅传感器可发挥非均匀多头读数布局的优势，如图 3 所示。由于光栅的读数头可以上下错位，因此在布局时，将上读数头和下读数头的径向间距尽可能设置为较小值，这样有利于实现较优性能。读数头可在不同的刻划面上均布或非均匀分布，读数头的个数可根据需要进行确定。立体光栅测角传感器系统可以在端面和柱面两个维度上自由布置读数头，进而减小径向尺寸。这两个维度的结合会更好

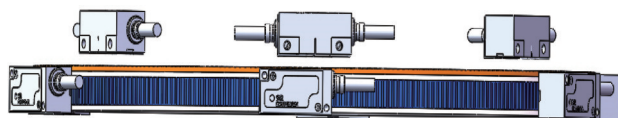


图3 立体光栅多头读数布局示意图

Fig. 3 Layout diagram of stereo grating multi-head reading

地抑制轴系误差,进而在减小尺寸的前提下,又进一步提高了测角精度。光栅盘尺寸的减少,也就降低了成本。也就是说,在没有增大径向尺寸的前提下,立体光栅测角传感系统增加了光栅的维度,同时提高了测角精度。

4 实验

4.1 实验系统设计

本文采用由上端面 and 柱面两种测角传感器组合的立体光栅测角传感器,图4为立体光栅测角传感器示意图,图5为实验系统示意图。该系统采用机械轴系结构,同一根轴的一端能够同时安装柱面光栅和端面光栅,且具有较高的同轴度。

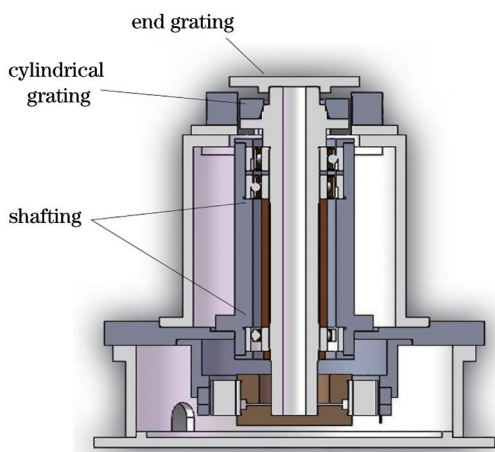


图4 立体光栅测角传感器示意图

Fig. 4 Schematic of stereo grating angle sensor

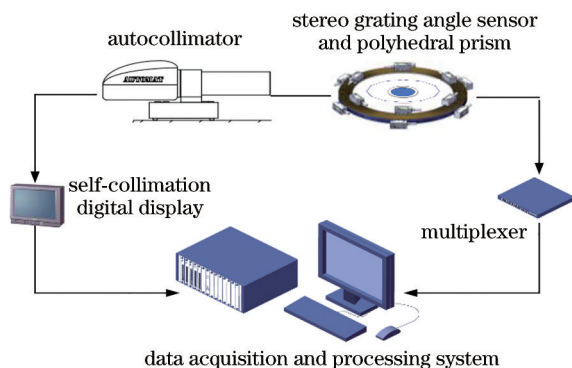


图5 实验系统示意图

Fig. 5 Schematic of experimental system

4.2 均匀分布立体光栅测角传感器实验

图6为实验系统实物图,立体光栅采用端面均布6个读数头、柱面均布4个读数头的布局形式。端面光栅选用MicroE公司的M3000型号的读数头和R10851-HD圆光栅。柱面光栅选用Renishaw的SiGNUM™RESM系列金属圆光栅及读数头。对于端面光栅与柱面光栅测角传感器的测量值,采用加权求平均的处理方法。图7为选用36面棱体进行校准实验获得的误差曲线,由误差曲线可知,在0°~360°的测量范围内,误差曲线的峰峰值为-3.59"和3.16",测角误差为6.75"。

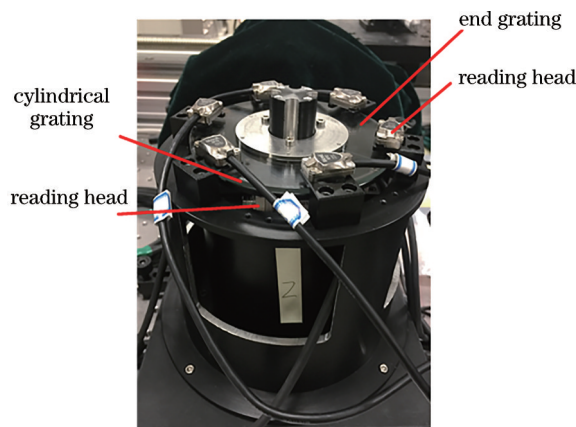


图6 均匀分布立体光栅测角传感器实物图

Fig. 6 Physical map of stereo grating angle sensor with uniform distribution

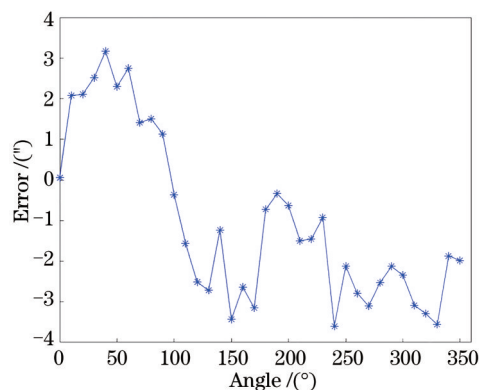


图7 均匀分布立体光栅测角传感器的测角误差曲线

Fig. 7 Angle error curve of stereo grating angle sensor with uniform distribution

4.3 非均匀分布立体光栅测角传感器实验

课题组前期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^[15]。利用图5所示实验系统,通过改变端面读数头的布局方式进行实验。即采用3个读数头与4个读数头混合布局的形

式,柱面光栅采用4个读数头均匀分布的布局方式。图8所示为端面读数头的布局方式,图9所示为实验系统的实物图。图10所示为利用多面棱体进行

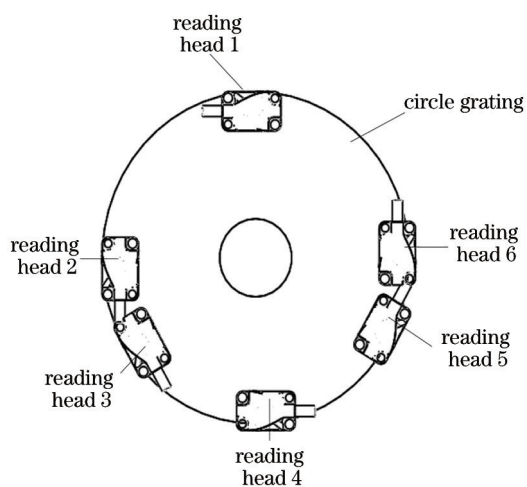


图8 端面读数头的布局方式示意图

Fig. 8 Layout diagram of end reading head

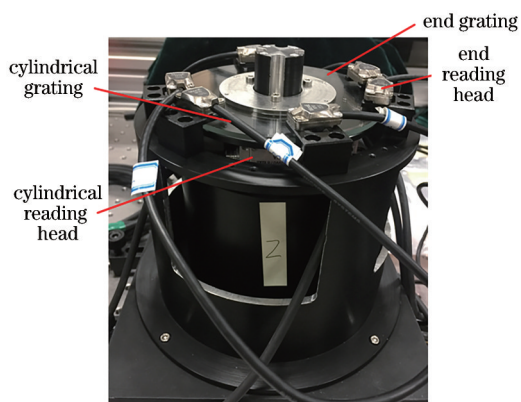


图9 非均匀分布立体光栅测角传感器的实物图

Fig. 9 Physical map of stereo grating angle sensor with non-uniform distribution

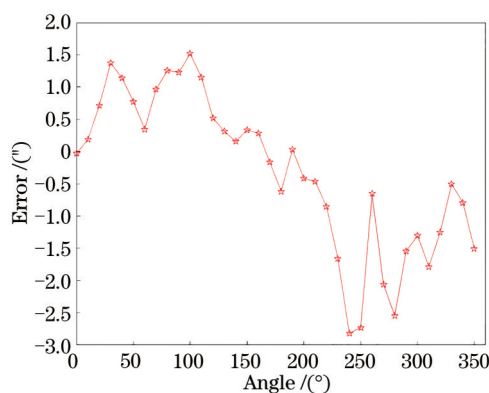


图10 非均匀分布立体光栅测角传感器的测角误差曲线

Fig. 10 Angle error curve of stereo grating angle sensor with non-uniform distribution

校准得到的误差曲线,根据误差曲线可知,在 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 的测量范围内,误差曲线的峰峰值为 $-2.82''$ 和 $1.51''$,测角误差为 $4.33''$ 。

5 结 论

从辐通量和莫尔条纹的角度,分析了与端面光栅和柱面光栅的轴系误差,建立了误差模型,设计了一款结合端面和柱面光栅的立体光栅测角传感器。立体光栅测角传感器可根据实际需求自由选择栅线刻划面和读数头布局方式。搭建了含有上端面和柱面光栅的立体光栅测角传感器实验系统,进行了读数头均匀分布和非均匀分布实验。实验结果表明,采用均匀分布的读数头时,立体光栅测角传感器的误差为 $6.75''$;采用非均匀分布的读数头时,立体光栅测角传感器的误差为 $4.33''$ 。立体光栅测角传感器在不增大尺寸的情况下,解决了尺寸和精度之间难以调和的矛盾,为研制高精度测角传感器、提升测角传感器性能提供了新思路。

参 考 文 献

- [1] Su D F, Xu Z J, Jia J Q, et al. Read-head design for improving the precision of circular grating angular measuring system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(7): 653-657.
苏东风, 续志军, 贾继强, 等. 提高圆光栅测角系统精度的读数头设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(7): 653-657.
- [2] Huang Y, Xue Z, Lin H, et al. Development of portable and real-time self-calibration angle encoder [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9903: 99030F.
- [3] Wang Y, Xue Z, Huang Y, et al. Study on self-calibration angle encoder using simulation method[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9903: 99032O.
- [4] Zhang R, Huang Q X, Wu T T, et al. Research of compensating angle error to the 2D stage in real time [J]. China Measurement & Test, 2018, 44(8): 102-106.
张芮, 黄强先, 伍婷婷, 等. 二维工作台角度误差实时补偿研究[J]. 中国测试, 2018, 44(8): 102-106.
- [5] Cai N, Xie W, Peng H X, et al. A novel error compensation method for an absolute optical encoder based on empirical mode decomposition[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 88: 81-88.
- [6] Geckeler R D, Link A, Krause M, et al. Capabilities and limitations of the self-calibration of angle encoders [J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25

- (5): 055003.
- [7] Watanabe T, Kondo Y, Fujimoto H. Evaluation of dynamic spindle run out ability of self-calibratable rotary encoder [C]//Proceedings of 11th Laser Metrology for Precision Measurement and Inspection in Industry 2014, September 2-5, 2014, Tsukuba, Japan. [S.l.: s.n.], 2014.
- [8] Huang Y, Xue Z, Wang H Y. Comparison between angle interferometer and angle encoder during calibration of autocollimator[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9446: 944624.
- [9] Ren X, Du S P, Chen K, et al. Error source and spectrum analysis for angle measurement of circular grating encoder[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(17): 171205.
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): 171205.
- [10] Huang L, Pan N, Ma W L, et al. Error analysis and experimentation of scale tape encoder[J]. Chinese Optics, 2015, 8(3): 464-470.
黄龙, 潘年, 马文礼, 等. 拼接式编码器测角误差分析及试验[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 464-470.
- [11] Ai C G, Chu M, Sun H X, et al. Eccentric testing of benchmark circular grating and compensation of angular error[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2479-2484.
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.
- [12] Guo Y K, Li Y H, Li Q X, et al. Error compensation for eccentric motions of circular gratings[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2005, 45(2): 178-181.
郭阳宽, 李玉和, 李庆祥, 等. 运动偏心对圆光栅副测量的影响及误差补偿[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(2): 178-181.
- [13] Wang Y. The installation eccentricity error measurement and compensation technique for circular grating[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
王园. 圆光栅安装偏心误差测量与补偿技术[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [14] Zhai Z S, Cheng Z, Zhang Y H, et al. Optical analysis of moiré fringes of concentric-circle gratings [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(7): 070501.
翟中生, 程壮, 张艳红, 等. 同心圆光栅莫尔条纹的光学分析[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 070501.
- [15] Zhang W Y, Lao D B, Zhou W H, et al. Suppression method for angle measurement error of mixing-layout multiple reading head[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(9): 2339-2346.
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.