

# 一种光电编码器转角精度检测方法的误差分析

张桂林 姜涛 李敏

(长春理工大学机电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要** 针对高精度光电编码器转角精度的检测,提出了一种基于双频激光干涉仪的光电编码器转角精度检测方法,并研制了相应的检测装置。该装置以步进电机为驱动元件,通过减速机构带动被检编码器和角度基准旋转,以 Renishaw 双频激光干涉仪为角度基准检测仪器,使用 Renishaw RX10 回转轴校准组件为角度旋转基准,检测精度达  $1.36''$ 。分别使用该装置和传统手动检测装置对 21 bit 绝对式编码器进行精度检测对比实验,结果表明,该装置是可行的,且在检测效率、检测精度上均高于传统检测装置。

**关键词** 激光光学; 双频激光干涉仪; 光电编码器; 转角精度

**中图分类号** O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0808001

## Error Analysis on Measurement of Photoelectrical Encoder Corner Precision

Zhang Guilin Jiang Tao Li Min

(College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

**Abstract** According to the detection accuracy of the high precision photoelectric encoder corner, a photoelectrical encoder corner precision measurement method based on dual-frequency laser interferometer is proposed. This device is driven by stepping motor. Through the reduction mechanism, the inspection encoder and the angle reference can be rotated. By using the Renishaw dual-frequency laser interferometer as the angle benchmark testing instruments and Renishaw RX10 rotors calibration module as large angle rotation reference, precision of  $1.36''$  is obtained. Traditional manual device and the proposed device in a 21 bit absolute encoder are used respectively for precision testing. The results show that the device is feasible, and that the test efficiency and precision are higher than those of the traditional detection device.

**Key words** laser optics; dual-frequency laser interferometer; photoelectrical encoder; corner precision

**OCIS codes** 120.3180; 120.4630; 120.4880; 140.3460; 140.3430

## 1 引 言

在光电编码器精度日益提高的背景下,对光电编码器转角精度的检测也越来越受到重视。目前对编码器转角检测的方法主要有示波器法、多面棱体法、自准直仪法、多齿分度盘法以及使用更高精度编码器直接对比法等<sup>[1]</sup>。在传统检测中,上述方法均采用手动检测,近几年,在精密位移技术发展的带动

下,编码转角精度自动检测装置开始出现在人们视野<sup>[2]</sup>,但这些装置普遍存在检测品种单一、检测精度低、检测效率不高等不足。为解决以上问题,在激光测量技术得到广泛运用的前提下<sup>[3-5]</sup>,本文提出了一种基于双频激光干涉仪的编码器转角精度检测装置,并对装置结构及原理进行了简要介绍,同时对装置进行了误差分析,最后进行了本装置检测与传统

收稿日期: 2013-02-04; 收到修改稿日期: 2013-03-22

作者简介: 张桂林(1990—),男,博士研究生,主要从事在线检测理论与技术方面的研究。

E-mail: guilin512400@yahoo.com.cn

导师简介: 姜涛(1969—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事光电在线检测方面的研究。

E-mail: jiangtao@cust.edu.cn(通信联系人)

检测方法的对比实验,从而完成了装置的验证。

## 2 检测装置结构及原理

### 2.1 检测装置组成

考虑到检测装置高精度、智能化、通用性的要求,结合实际工作情况,提出如图 1 所示装置结构设计

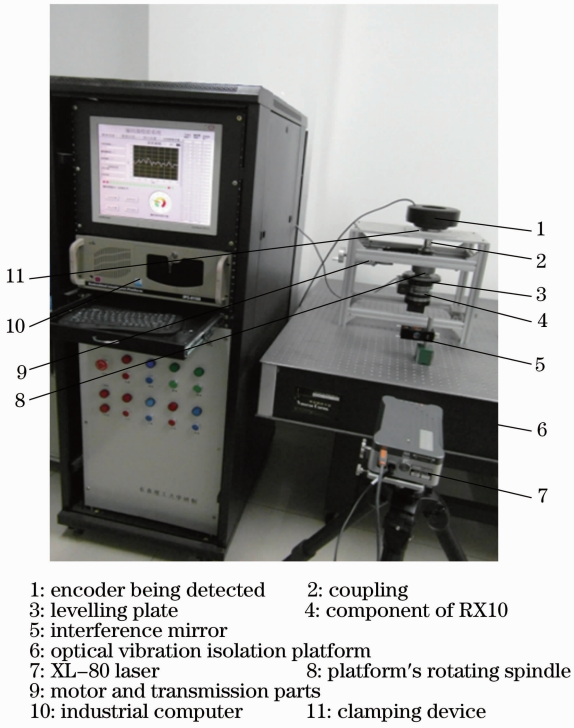


图 1 编码器精度检测系统实验装置

Fig. 1 Experimental setup for encoder precision detection system

计方案。整个系统可以分为以下几个部分:通用装夹模块、精密传动模块、角度基准模块、光学精密隔振平台以及上位机系统模块。通用装夹模块主要由自制定位装置和联轴器组成,自制定位装置将被检编码器固定在装置上,联轴器用于被检编码器旋转轴与检测装置旋转主轴的连接;精密传动模块主要由步进电机、蜗轮蜗杆减速器以及装置主轴组成,电机输出角位移经蜗轮蜗杆减速器减速后带动装置主轴旋转;角度基准模块主要由角度基准组件、水平调整块、双频激光干涉仪组成,角度基准组件提供检测角度基准,水平调整块用于调整回转轴校准组件与水平面之间的夹角;检测装置安装在精密光学隔振平台上,通过上位机人机交互界面进行控制管理。

本装置角度基准组件主要由 Renishaw XL-80 双频激光干涉仪和 Renishaw RX10 回转轴校准组件构成。如图 1 所示,具体使用时,将 RX10 安装在主轴上,反射镜固定在 RX10 上,干涉镜组件放置于 RX10 与 XL-80 之间,测量时,RX10 与被检编码器同时旋转,XL-80 测得角位移量,并作为角度基准使用。

### 2.2 检测原理

Renishaw XL-80 双频激光干涉仪与 Renishaw RX10 回转轴校准组件配合实现角度测量的基本原理是:利用直线轴上角度变化与引起的位移变化之间的线性关系将角度测量转化为线性位移测量,最终再将线性测量转化为角位移并显示。装置通过数据采集模块、运动控制模块及上位机管理系统完成检测过程,其具体工作原理如图 2 所示。

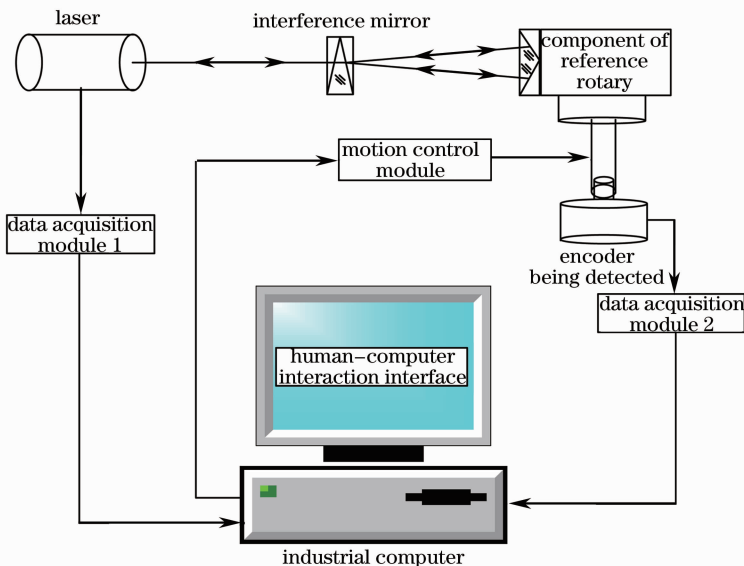


图 2 系统工作原理图

Fig. 2 Schematic of system work

具体工作时,通过上位机进行检测方式、电机速度及方向、通信速率等参数设定;上位机将参数传送给相应的数据采集模块以及运动控制模块;运动控制模块控制被检编码器及回转轴校准组件进行旋转,数据采集模块完成对基准数据和被检编码器数据的采集,并传送到上位机实时处理、显示。整个系统流程如图3所示。

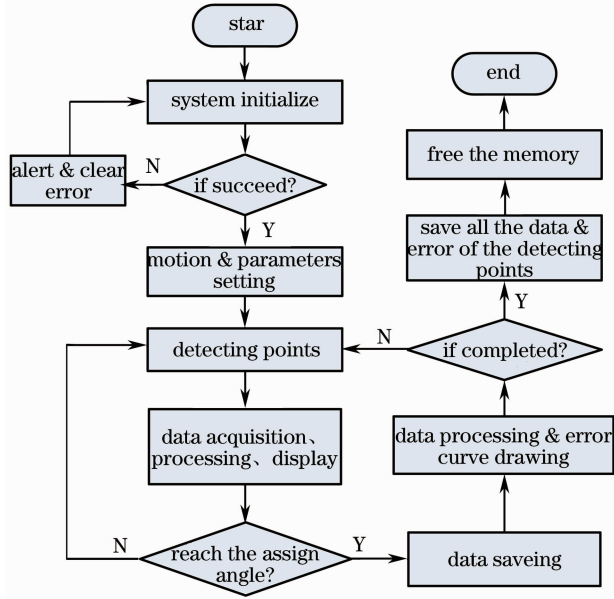


图3 系统程序流程

Fig. 3 Flow chart of systematic procedure

在检测过程中,上位机实时显示编码器数据、基准数据及两者误差数据,当旋转到指定检测点时,电机暂停运动,上位机提取该检测点检测数据并进行误差曲线的绘制,完成检测点的数据处理后进入下一检测点的数据采集,如此循环直至所有设定检测点都检测完毕。检测完成后,上位机保存并显示所检测结果,通过选择可以对数据进行输出打印。

### 3 系统误差分析

基于双频激光干涉仪的高精度编码器转角精度检测装置是一种动态、非接触精密检测系统,其误差按来源可分为环境误差、机械误差、计算误差三大类<sup>[6-8]</sup>,其中环境误差指的是由温度、湿度、大气压变化引起的光源变化而带来的误差;机械误差指的是机械加工误差和机械安装误差;计算误差指的计算单元对信号进行采集、计算过程中的误差,如细分误差、舍入误差、模型误差等;这里仅对环境误差和机械安装误差加以进行分析。

#### 3.1 环境误差

在检测过程中,检测环境的变化对激光光源有

一定影响。在分析环境变化引起的误差时,参考埃德林公式<sup>[9-10]</sup>,在标准状态下,空气温度  $t$ 、气压  $p$ 、湿度  $f$  对空气折射率  $n$  的影响分别为

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -0.929 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial n}{\partial p} = 0.269 \times 10^{-8} \text{ Pa}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial n}{\partial f} = -0.98 \times 10^{-8} \text{ RH}. \quad (3)$$

由(1)~(3)式得环境对空气折射率影响为

$$n = n_0 - 0.98 \times 10^{-8} \Delta f + 0.269 \times 10^{-8} \Delta p - 0.929 \times 10^{-6} \Delta t. \quad (4)$$

式中  $n_0$  为标准状态下空气的折射率,  $\Delta f$ ,  $\Delta p$ ,  $\Delta t$  分别为温度、压力、温度相对于标准状态下的变化量。双频激光干涉仪叠栅条纹数  $N$  与 RX10 旋转角度之间关系为  $\alpha = \frac{N\lambda_0}{2R}$ ; 已知波长与空气折射率关系

为  $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$ , 则环境引起的误差为

$$\sigma_4 = \frac{N\lambda_0}{2R} \left( \frac{1}{n} - 1 \right), \quad (5)$$

式中  $\lambda_0$  为初始波长,  $R$  为 RX10 回转轴校准组件上的反射镜旋转半径。

假设湿度变化  $\Delta f = 10\% \text{ RH}$ , 气压变化为  $\Delta P = 50 \text{ Pa}$ , 温度变化为  $\Delta t = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ , 结合(4)、(5)式得旋转一周环境引起的误差为

$$\sigma_4 = \frac{N\lambda_0}{2R} \left( \frac{1}{n} - 1 \right) \times 3600 = 2\pi \left( \frac{1}{n} - 1 \right) \times 3600 = 0.021''.$$

#### 3.2 机械安装误差

在实际检测中,由于存在安装误差,被检编码器旋转轴线与 RX10 回转轴校准组件上反射镜旋转轴

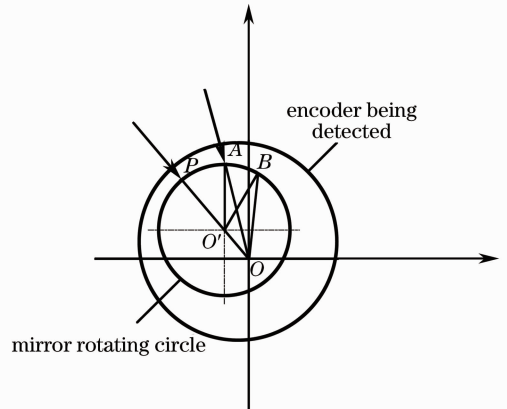


图4 偏心误差示意图

Fig. 4 Schematic diagram of eccentricity error

线之间往往不同轴,使检测结果出现偏心误差。如图4所示,以被检编码器中心为原点,建立直角坐标系,假设被检编码器轴线与反射镜旋转轴线之间偏心为 $OO'$ , $OP$ 为入射光束。

假设激光入射点 $P$ 与被检编码器轴心、反射镜轴线在同一条直线上,被检编码旋转角度为 $\angle POA$ 。在三角形 $\triangle PO'A$ 、 $\triangle POA$ 中,有 $\angle PO'A = \angle POA + \angle O'AO$ ,其中双频激光干涉仪测得角度为 $\angle POA$ ,偏心误差为: $\sigma'_3 = \angle O'AO = \angle PO'A - \angle POA$ ,在三角形 $\triangle O'AO$ 中引入正弦定理有

$$\frac{OO'}{\sin \angle O'AO} = \frac{O'A}{\sin \angle O'OA},$$

$$\angle O'AO = \arcsin\left(\frac{OO'}{O'A} \sin \angle O'OA\right),$$

$$\sigma'_3 = \arcsin\left(\frac{OO'}{O'A} \sin \angle O'OA\right). \quad (7)$$

不失一般性地,假设激光入射点为 $A$ ,编码器旋转角度为 $\angle BOA$ 。见图4所示,在三角形 $\triangle O'AO$ 、 $\triangle O'BO$ 中, $\angle AO'B + \angle O'AO = \angle BOA + \angle O'BO$ ,其中双频激光干涉仪测得角度为 $\angle AO'B$ ,偏心误差为: $\sigma_3 = \angle AO'B - \angle AOB = \angle O'BO - \angle O'AO$ 。类似地,在三角形 $\triangle O'BO$ 中引入正弦定理,并化简有

$$\sigma_3 = \arcsin\left(\frac{d}{R} \sin \angle O'OB\right) - \angle O'AO, \quad (8)$$

式中 $d$ 为偏心距。 $\angle O'OB$ 为编码器转角,反射镜固定后旋转半径不变,假设为 $75 \text{ mm}$ ,偏心距离分别取 $3$ 、 $1$ 、 $0.5 \text{ mm}$ ,并代入(8)式,绘制误差曲线如图5所示。

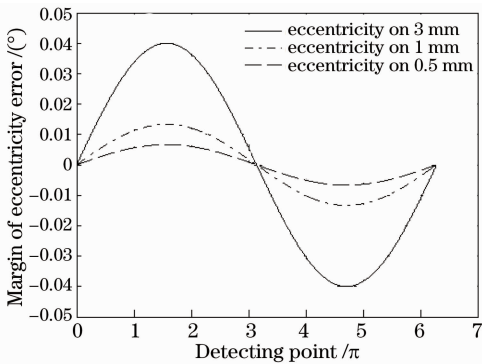


图5 偏心误差图

Fig. 5 Margin of eccentricity error

从图5可知,当反射镜回转轴心与被检编码器旋转轴心偏心距为 $3 \text{ mm}$ 时,带来最大误差为 $0.04^\circ$ ;当偏心距为 $1 \text{ mm}$ 时,带来最大误差为 $0.012^\circ$ ;当偏心距为 $0.5 \text{ mm}$ 时,带来最大误差为 $0.006^\circ$ 。由此可见,偏心距的大小对引入误差具有较大影响,且呈正弦规律变化。设有理想激光入射点 $P'$ 与实际激光入射点 $P$

角度相距 $180^\circ$ ,则理想激光入射点 $P'$ 测量值 $\sigma_3$ 与实际激光入射点 $P$ 测量值 $\sigma_{3r}$ 反相,即 $\sigma_3 = -\sigma_{3r}$ ,代入偏心误差计算有 $\sigma_3 + (-\sigma_{3r}) = 0$ 。

### 3.3 其他误差及误差合成

在本装置中其他机械误差主要来源于传动模块和装置主轴。当到达检测点时,系统会向电机发出指令,要求电机停止运动,但由于转动惯量的存在,电机在停止之前会发生一定的角位移<sup>[11]</sup>,其大小由机构精度决定。假设电机定位精度为 $0.036^\circ$ ,减速器减速比 $i=100$ ,则机构误差为

$$\sigma_1 = \frac{0.036^\circ}{100} \times 3600 = 1.296''. \quad (9)$$

双频激光干涉仪对光电编码器转角精度的检测其原理是:测量基准角位移引起的光程差变化,然后将光程差变化量转化为角位移量。由于主轴的径向晃动、角运动都带来误差,而主轴的轴向窜动并不引起光程差变化,因此只考虑径向晃动、角运动所带来的误差。这里忽略润滑油及轴系零件形状误差,假设轴承间隙为 $l=3 \mu\text{m}$ ,则径向晃动误差为

$$\sigma'_2 = \frac{l}{2R} \times 3600 = 0.072'', \quad (10)$$

主轴角运动误差为

$$\sigma''_2 = \frac{l}{L} \times 3600 = 0.412''. \quad (11)$$

式中 $L$ 表示轴承与端面的距离。综上所述,装置总误差为

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2'^2 + \sigma_2''^2 + \sigma_4^2} = 1.362''. \quad (12)$$

## 4 实验数据及分析

为验证装置的可行性,分别用传统检测方法和上述装置对 $21 \text{ bit}$ 的绝对式矩阵编码器进行精度检测<sup>[12]</sup>,采取定点检测方式,每隔 $15^\circ$ 检测一次,记编码器误差为 $e = e_r - e'$ 。其中 $e_r$ 为双频激光干涉仪测量值, $e'$ 为被检编码器示值。两种检测方法的记录数据分别如表1和表2所示。

标准差计算公式<sup>[13]</sup>可表示为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (13)$$

式中 $\bar{x}$ 是被检编码器平均误差值, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ , $x_i$ 为被检编码器误差值, $n$ 为检测点数。将表1、2数据分别代入(13)式得传统手动检测标准差 $\sigma_s = 3.12''$ ;装置检测标准差 $\sigma_d = 2.97''$ ,校准耗时分别为 $50 \text{ min}$ 和 $10 \text{ min}$ 。可见本装置具有较高的检测效率。

表1 装置检测实验数据

Table 1 Data of system detecting experiment

Detecting data / (°)	Error / (")	Detecting data / (°)	Error / (")	Detecting data / (°)	Error / (")	Detecting data / (°)	Error / (")
14.9913	-2.3	104.9958	-1.3	195.0001	1.2	285.0006	3.2
29.9937	-1.3	120.0017	4.6	210.0002	0.8	299.9950	-0.9
45.0035	3.2	135.0015	2.1	225.0018	-4.1	315.0006	-4.1
59.9903	-1.7	150.0008	-2.6	239.9940	0.3	329.9955	0
74.9956	2.4	164.9993	1.5	255.0008	-1.6	344.9957	-1.3
89.9952	1.8	180.0001	-2.2	270.0009	-2.6	359.9955	0

表2 传统检测实验数据

Table 2 Data of traditional detecting experiment

Detecting data / (°)	Error / (")	Detecting data / (°)	Error / (")	Detecting data / (°)	Error / (")	Detecting data / (°)	Error / (")
14.98	-3.46	104.99	-1.73	195.06	1.26	285.01	3.05
29.96	-1.32	120.01	5.28	210.02	0.92	299.95	-1.07
45.00	2.36	135.02	1.91	225.01	-4.21	315.00	-4.27
59.97	-1.86	150.04	-3.92	239.99	0.27	329.97	0.02
74.95	2.54	164.93	1.12	255.07	-1.73	344.93	-1.45
89.97	2.42	180.00	-2.44	270.02	-2.85	359.99	0

绘制误差曲线如图6所示。

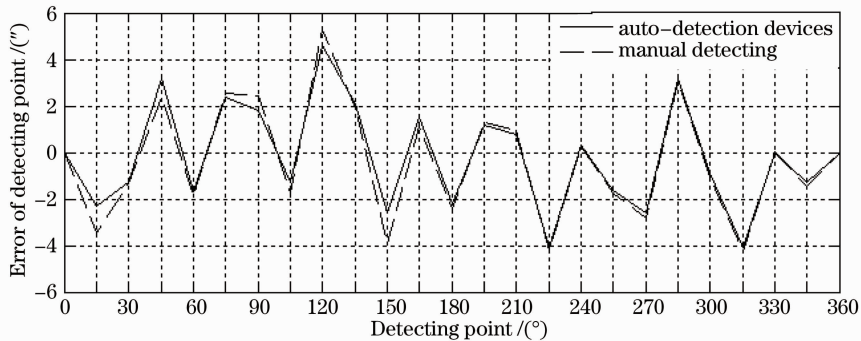


图6 误差曲线

Fig. 6 Error curves

## 5 结 论

介绍了一种基于 Renishaw 双频激光干涉仪的编码器转角精度检测方法及装置,简述了装置的组成及工作原理,并对装置主要误差来源进行了分析。最后,对一个 21 bit 的绝对式矩阵编码器进行了传动方法检测和本装置检测的对比实验,实验显示:本装置检测数据与传统检测方法检测数据具有一定跟随性,即本装置具有可行性;从检测效率及检测精度上看,本装置高于传统手动检测。

## 参 考 文 献

1 Zhao Zhu, Xu Zhijun, Wang Xianjun. An automatic detection system of encoder error based on motion control technology[J].

Chinese J Optics and Applied Optics, 2009, 2(2): 134-138.

赵柱, 续志军, 王显军. 基于运动控制技术的编码器自动检测系统[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(2): 134-138.

2 Zhang Zuo, Qu Zhengbiao, Qiang Xifu. A new method of dynamic angle measurement with dual-frequency interferometer [J]. Chinese J Scientific Instrument, 1997, 18(5): 509-517.

张琢, 曲政标, 强锡富. 一种双频激光动态转角测量的新方法 [J]. 仪器仪表学报, 1997, 18(5): 509-517.

3 Chen Fengjun, Yin Shaohui, Yu Jianwu, et al.. An ultra-precision on-machine measurement method of aspheric surface [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(7): 071203.

陈逢军, 尹韶辉, 余剑武, 等. 一种超精密非球面在位测量方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(7): 071203.

4 Li Jianxin, Cui Yanjun, Zhu Rihong, et al.. Micro-displacement variation measurement by using laser interference based on wavelet transform [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(8): 0808002.

李建欣, 崔艳军, 朱日宏, 等. 基于小波变换的激光干涉微位移变化量测量方法 [J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0808002.

5 Yuan Ruwang, Jiang Xiuming, Yang Gongyuan. Measuring

- method for appearance unevenness of fiber bundles[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0708001.
- 袁汝旺, 蒋秀明, 杨公源. 纤维束条干外观不匀的激光测量方法[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0708001.
- 6 Hou Wenmei, Zhang Yunbo, Le Yanfen, et al.. Elimination of the nonlinearity of heterodyne displacement interferometers[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(9): 0908006.
- 侯文玫, 张运波, 乐燕芬, 等. 外差激光干涉测长非线性误差的消除[J]. 中国激光, 2012, 39(9): 0908006.
- 7 Dai Gaoliang, Chao Zhixia, Yin Chunyong, et al.. Determining the residual nonlinear error of a dual-frequency interferometer for nanometrology[J]. Chinese J Lasers, 1999, 26(11): 987-992.
- 戴高良, 晁志霞, 殷纯永, 等. 纳米精度双频激光干涉仪非线性误差的确定方法[J]. 中国激光, 1999, 26(11): 987-992.
- 8 Yang Chunsheng, Zhang Tao, Cheng Junkang, et al.. Influence of nonlinearity on measuring precision of dual frequency laser interferometer with two longitudinal modes[J]. J Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2008, 38(3): 561-564.
- 杨春生, 张涛, 成俊康, 等. 双纵模双频激光干涉仪的非线性对测量精度的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2008, 38(3): 561-564.
- 9 Wang Yawei, Zhou Weihu, Wang Zhongyu, et al.. Correction method of air refractivity for laser tracking measurement system [J]. Optoelectronic Technology, 2011, 31(2): 83-86.
- 王亚伟, 周维虎, 王中宇, 等. 激光跟踪测量系统大气折射率修正方法[J]. 光电子技术, 2011, 31(2): 83-86.
- 10 倪育才. 空气折射率埃德林公式的修改[J]. 计量技术, 1998, (3): 22-27.
- 11 Zhang Leihong, Yang Yan, Hu Shanjiang, et al.. The moving characteristics of directional driving motor in space tracking system[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(2): 233-237.
- 张雷洪, 杨艳, 胡善江, 等. 空间激光跟踪中指向驱动电机运动特性研究[J]. 光学学报, 2008, 28(2): 233-237.
- 12 Hu Wenchuan, Qiu Zurong, Zhang Guoxiong. In-situ calibration method for large-scale space angle optical measurement system [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1008006.
- 胡文川, 裘祖荣, 张国雄. 大尺寸空间角度检测系统的现场标定方法[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1008006.
- 13 Yang Wei. Research of Auto-Detection System of Photoelectric Encoder Based on DSP[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- 杨巍. 基于DSP的光电编码器自动检测系统研究[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2010.

栏目编辑:何卓铭