

红外光源参数对光电编码器信号的影响

卢新然^{1,2}, 宋路¹, 万秋华²

(1. 长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130000;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 红外发光管是光电编码器的重要组成部分, 而光源参数对莫尔条纹信号的正弦性和正交性有直接影响, 从而影响光电编码器的细分精度和分辨力。文中研究了其发散角、光源宽度对编码器的信号影响。首先, 分析了光源对光栅信号光通量的影响, 运用频域方法导出了透光特性函数; 然后, 分析了两种不同光源对同一码盘形成信号的影响; 最后, 应用 Matlab 仿真计算了莫尔条纹信号的对比度、正交性、正弦性。实验结果表明, 使用两种不同光源的编码器精度相差达到 30%, 改进后的编码器高次谐波占比明显减少, 信号稳定性好。因此研究光源参数对提取高质量莫尔条纹有重要意义, 并为高精度编码器设计提供重要参考依据。

关键词: 光源; 发散角; 光源宽度; 仿真; 高质量光栅信号

中图分类号: TP212 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0917007

Effect of infrared light source parameters on photoelectric encoder

Lu Xinran^{1,2}, Song Lu¹, Wan Qiu-hua²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130000, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Infrared diodes are important components of photoelectric encoder, the orthogonality and sine of Moire fringe directly affect the segmentation accuracy and resolution of photoelectric encoder, and they affect the light source parameters. According to the investigation, the divergence angle and the width of light source exert a tremendous influence in signal of encoder. Firstly, the effect of light source on the grating signal flux was analyzed. The application of the frequency domain method helped deduce the function of light transmission feature; Then the impact of the two different light source on the signal creation with a yard plate and the contrast ratio was computed; Finally, orthogonality and sinusoidal property of the Moiré stripe signal were simulated at MATLAB environment. The result shows that the encoder accuracy difference between them reached 30% by applying different source. Higher harmonic proportion of the improved decoder decreases significantly and the signal stability is better. Studying the light source parameters has great significance in extracting the Moire fringe of high quality, and offers valuable reference for designing high-precision encoder.

Key words: light source; divergence angle; width of light source; simulation;
high-quality grating signal

收稿日期: 2017-01-10; 修订日期: 2017-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(51505078)

作者简介: 卢新然(1978-), 男, 副研究员, 博士生, 主要从事光电位移精密测量技术方面的研究。Email: luxinrancomp@aliyun.com

导师简介: 宋路(1952-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事光通信与信息处理技术方面的研究。Email: usong@126.com

0 引言

光源是光电编码器的重要组成部分,其光源参数对编码器的精度、分辨力、可靠性具有重要的影响^[1-4]。国内现有光电编码器主要使用的光源是霍尼维尔的发光二极管或者 Ic-haus 公司的红外发光二极管。目前,各研究单位对发光元件的选择和使用都比较随意,光电元件的准直度和发光管芯的宽度对光电信号主要参数——对比度、正交性、正弦性的影响没有深入了解,造成研制生产的离散性较大,光电编码器的精度和分辨力低,可靠性不高。随着编码器在航空航天领域的应用日益广泛,复杂的使用环境对编码器的可靠性提出了更高的要求,也对光源的选择和使用提出了更为细致的要求。目前只有针对 led 的理想化准直光源模拟设计及光源发散角对光栅光通量的影响,虽然光源的准直性和光源宽度对光电信号的影响较大,但是目前很少有研究人员对高精度光电编码器的红外光源参数对编码器的光电信号的影响进行具体分析和理论研究。

文中针对高精度编码器红外光源对信号的影响,从理论上说明光源发散角和光源宽度对信号指标的影响,对不同发散角的红外光源进行对比和分析,通过实际测试加以验证,为进一步了解光源特性对编码器信号的影响提供理论依据,可以为高质量莫尔信号提取和高精度光电编码器设计提供参考依据。

1 光源参数对信号的影响

1.1 光源发散角的影响

光电编码器是通过码盘和狭缝相对运动时衍射产生的莫尔条纹来实现角度测量的。光源在栅线法向上的宽度 b 与准直透镜焦距 f 之比称为光源的发散角 ψ ,光源的发散角和经过码盘和狭缝后的角度如图 1 所示^[5]。 ψ 表示光束偏离光轴的角度, ψ 值越

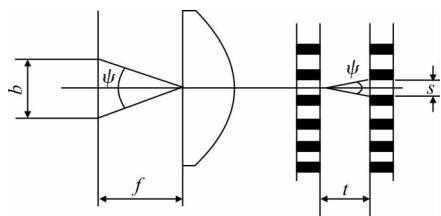


图 1 光源发散角示意图

Fig.1 Diagram of the light source divergence angle

小表示光源的准直性越好,其发出的光束与光轴的平行度越好。

编码器实际设计时都采用光栅条纹信号,其码盘和狭缝上的刻画光栅栅距相等,两光栅的交角 $\theta=0$,光栅条纹信号如图 2 所示。对于平行光源入射的莫

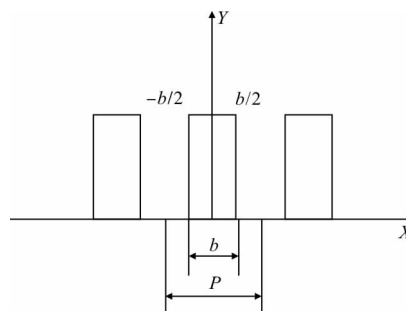


图 2 光栅信号示意图

Fig.2 Diagram of the signal of optical gate

尔条纹光场光栅函数的表达式为周期函数,如公式(1)所示。

$$y(x) = \begin{cases} 1, & -\frac{b}{2} \leq x \leq \frac{b}{2} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

式中: b 为光栅中透光区域宽度。经过傅里叶变换后,得到:

$$Y(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega x) \quad (2)$$

式中: $a_0 \sim a_n$ 分别为各次余弦分量的系数。求得的傅里叶系数为:

$$a_0 = \frac{1}{P} \int_{-\frac{P}{2}}^{\frac{P}{2}} f(x) dx = \frac{b}{P} \quad (3)$$

$$a_n = \frac{2}{P} \int_{-\frac{P}{2}}^{\frac{P}{2}} f(x) \cos(n\omega x) dx = \frac{2b}{P} \text{sinc}\left(\frac{nb}{P}\right) \quad (4)$$

式中: P 为光栅周期,将 a_0 和 a_n 代入公式(4)中,可以得到光栅透过特性的函数表达式:

$$Y(x) = \frac{b}{P} + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{2b}{P} \text{sinc}\left(\frac{n\omega b}{P}\right) \quad (5)$$

式中: $\omega = \frac{2\pi}{P}$ 称为基频^[6]。可以看出平行光源入射的光栅函数是由常数 $\frac{b}{P}$ 和多次正弦谐波组成的。

当编码器的光源与接收元件会与光轴有一定角度,这就会造成莫尔条纹光强和相位受光束发散角影响较大,当光源发出的光强一定时,接收元件的光

电流与接收到的光通量 $\Delta\Psi$ 成正比,即 $I \propto \Delta\Psi$,所以当发散角 θ 增大或者码盘和狭缝的间隙 e 增大时,接收元件的输出电流将减小,导致莫尔条纹信号变形或漂移^[7-8]。

1.2 光源宽度对信号的影响

实际光源总有一定的大小和宽度,通常称为扩展光源,这时可以看作是许多点光源的排列。假设将扩展光源分成多个强度相等、宽度为 dx' 的元光源,这时每个元光源到接收面的强度为 $I_0 dx'$,则在接收面形成干涉条纹的强度为:

$$dx = 2I_0 dx' \left[1 + \cos \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta' + \Delta) \right] \quad (6)$$

式中: Δ' 和 Δ 分别为从 c 点到接收面 P 点的一对干涉光束的左右方的光程差。其中 $\Delta = \frac{xd}{D}$, $\Delta' = \frac{x'd}{l}$ 。 $\beta = \frac{d}{l}$ 是到达干涉场某点时两条相干涉光束从实际光源发出时的夹角,如图3所示。因此宽度为 b 的光源在 P 点处的光强为:

$$I = \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}} 2I_0 \left[1 + \cos \frac{2\pi}{\lambda} (\Delta' + \Delta) \right] dx = 2I_0 \left[1 + \frac{\sin \frac{b\beta}{\lambda}}{\frac{\pi b\beta}{\lambda}} \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{d}{D} \right) x \right] \quad (7)$$

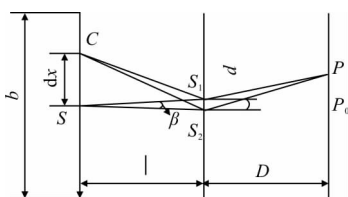


图3 光源宽度对信号的影响

Fig.3 Effect of the width of light source on signal

由公式(7)可以知道光强与孔径角 β 在一定数值范围内成反比关系,在 β 所限定的空间范围内,光源发出的光是相互干涉的,只有在一定范围内的光源宽度,形成的干涉条纹具有很好的对比度。

针对上述介绍可以知道当光源很宽时,在光源的两个边缘处发出的光产生条纹会产生位移,当这些错位的条纹相互重叠时,莫尔条纹的对比度会下降,光栅的栅距越细,间距越大,对比度下降地越厉害。这种由于光源宽度变化而引起的对比度变化可以用下面的公式近似计算:

$$B' = B \frac{\sin \frac{\pi x t}{p f}}{\frac{\pi x t}{p f}} \quad (8)$$

式中: p 为栅距; f 为聚光镜焦距; x 为光源宽度; B 为条纹上亮度变化幅度与视场平均亮度之比,理想条件下 $B=1$; B' 为光源有一定宽度时和光栅存在间隙时亮度变化幅度与视场平均亮度之比,即对比度。

根据公式(8)可以说明信号的对比度以 $\sin \frac{\pi x t}{p f} / \frac{\pi x t}{p f}$ 的比率下降。根据编码器的装调经验可以确定,在光栅栅距、光栅间隙确定的情况下,信号对比度与光源的宽度有直接影响,对比度的变化曲线如图4所示。

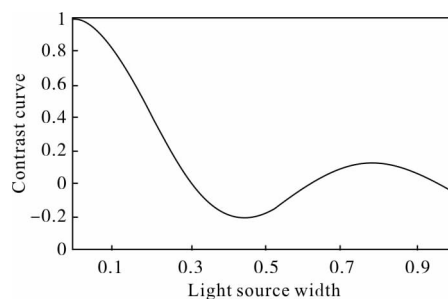


图4 对比度与光源宽度的变化曲线

Fig.4 Variation curve of the contrast and width of light source

2 实验

为验证光源发散角和光源宽度对光电编码器的影响,文中着重列举两种光电编码器常用的发光元件,分别是 Honeywell 的 SE2460 和 SEP8705,对其在相同电压下产生的光电莫尔条纹信号的对比度、正交性、正弦性进行对比。两种发光元件的具体参数如表1所示。

表1 两种光源的具体参数

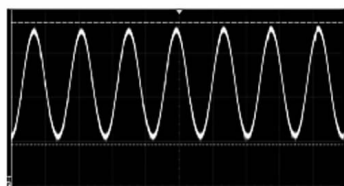
Tab.1 Specifications of two light source

	Divergence angle/(°)	Width of light source/mm ²	Wavelength/nm	Diameter of source
SE2460	18	0.25×0.25	935	φ1.6
SEP8705	15	0.5×0.5	935	φ3

表1中可以看出,SE2460的发散角要比SEP8705的发散角大3°,而SE2460的光源宽度要比SE8705的光源宽度小一倍。实验用光电编码器的码盘光栅栅距 $p=0.05 \text{ mm}$, $f=2.5 \text{ mm}$,光栅间隙 $t=0.16 \text{ mm}$ 。

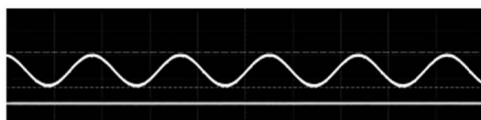
2.1 莫尔条纹对比度实验

莫尔条纹的对比度又叫信号反差,适用于原始光电信号,是莫尔条纹光电信号的重要指标之一,它直接影响光电信号的直流分量,进而影响光电编码器的电路细分精度和检测精度。对比度可以表示为: $C=V_{max}/V_{min}$ 。在同一接收光电元件和同一路信号示波器显示的条件下得到的对比度如图 4(a)、(b)所示。



(a) SE2460 信号对比度

(a) Signal contrast of SE2460



(b) SEP8705 信号对比度

(b) Signal contrast of SEP8705

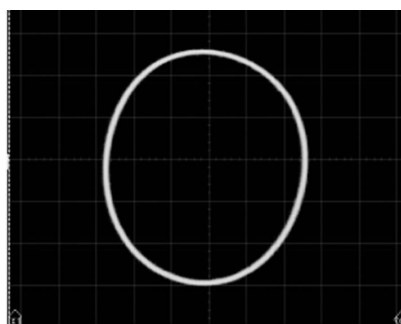
图 4 SE2460 和 SEP8705 信号对比度

Fig.4 Signal contrast of SE2460 and SEP8705

经过计算得到对比度分别为 3.83 和 3.33,符合公式(8)中对光源宽度对信号对比度的影响。实际工作中对比度高的信号直流分量所占比重小,信号稳定,不容易产生漂移。

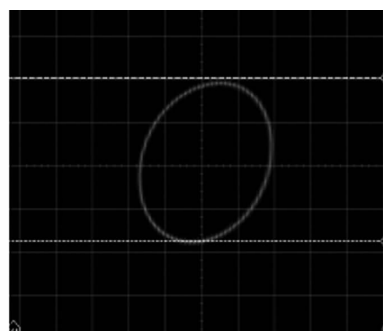
2.2 莫尔条纹正交性实验

光电信号正交性是指两路信号之间的相位差应该是 90° ,正交性好的两路信号形成的图形为正圆。判断正交性的直观方法是通过示波器观察李萨育图形。对两种光源形成的正余弦信号相位差分别如图 5 (a)、(b)所示。



(a) SE2460 信号相位图

(a) Signal phase diagram of SE2460



(b) SEP8705 信号相位图

(b) Signal phase diagram of SEP8705

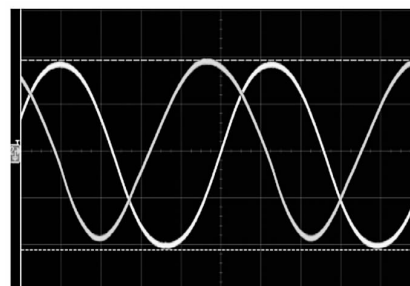
图 5 SE2460 和 SEP8705 信号相位图

Fig.5 Signal phase diagram of SE2460 and SEP8705

SE2460 信号相位图基本近似正圆,角度在 87° 左右;SEP8705 信号相位差较大,达到 85° 左右,正交性较差。

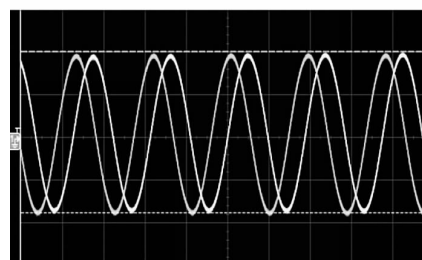
2.3 莫尔条纹正弦性实验

光电编码器的信号正弦性是指所提取的光电信号波形为正弦波。可以通过信号二次谐波以上的各次谐波幅值与基波幅值的比值之和来表示。高次谐波含量较高时,会造成信号谐波失真,影响电子学细分和精度^[9]。通过示波器采集得到两种光源的正余弦信号如图 6(a)、(b)所示。



(a) SE2460 产生的正弦信号

(a) Sine signal of SE2460



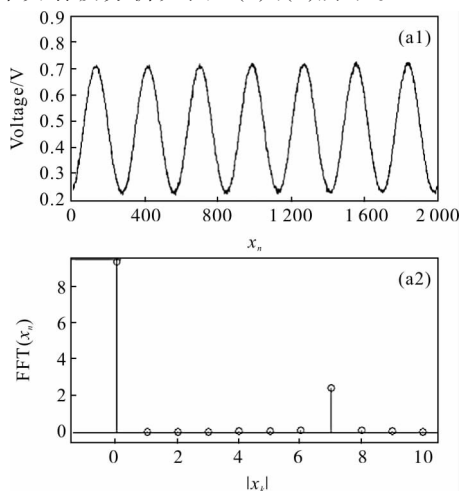
(b) SEP8705 产生的正弦信号

(b) Sine signal of SEP8705

图 6 SE2460 和 SEP8705 产生的正弦信号

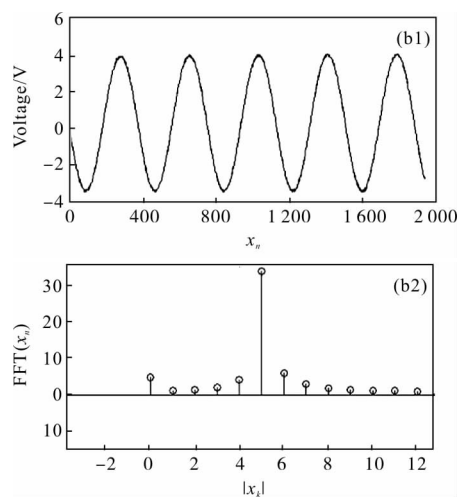
Fig.6 Sine signal of SE2460 and SEP8705

经过 Matlab 离散化处理和傅里叶变换计算得到的各次谐波分析如图 7(a)、(b)所示。



(a) SE2460 信号的谐波分析
(a) Harmonic analysis of SE2460

对比两者谐波图可看出,SE2460 提取的 7 个周期采样信号中,直流比重很大,其他高次谐波中 1 次谐波比重相对明显,正弦性好;SEP8705 提取的 5 个采样信号中直流分量比重较小,1 次谐波比重较大,正弦性较差。



(b) SEP8705 信号的谐波分析
(b) Harmonic analysis of SEP8705

图 7 SE2460 和 SEP8705 信号的谐波分析
Fig.7 Harmonic analysis of SE2460 and SEP8705

2.4 测角精度对比实验

两种光源采集的信号经过细分后,与粗码连接得到 24 位编码器,其精度检测结果分别如表 2、3 所示,检测单位为秒。

表 2 SE2460 检测结果

Tab.2 Test result of SE2460

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Errors	0	-0.07	-0.18	0.47	0.43	0.85	-0.29	-0.32	-0.16	0.06	1.01	0.32
Number	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	-
Errors	0.85	0.05	-0.36	-0.25	-0.21	0.65	-1.03	0.76	-0.76	-0.26	-0.1	-

精度均方值为 $\sigma=0.56''$ 。

表 3 SEP7805 检测结果

Tab.3 Test result of SEP7805

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Errors	0	0.54	-1.9	0.71	0.47	-0.19	-0.04	-0.12	-1.2	1.14	1.21	-0.88
Number	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	-
Errors	1.11	0	-1.12	-0.36	-0.08	-0.48	-1.01	0.48	-1.3	-0.15	-0.7	-

精度均方值为 $\sigma=0.82''$ 。

两者的精度差别达到 $0.26''$,相差达到 31%,可见光源对信号及对细分和后续处理影响显著^[10]。

综上所述,光源的发散角和光源宽度对信号的指标会产生较大的影响,其对信号的影响总结如表 4 所示。

表 4 光源参数对信号的主要影响

Tab.4 Main effect of the light source parameters on signal

Number	Contrast	Orthogonality	Sine
Divergence angle		●	●
Width of light source	●		●

照明光线有较大发散角时, 细分信号波形的上升沿与下降沿通常不对称, 增加了波形中的偶次谐波成分, 进而影响信号的正交性和正弦性^[11]。

照明光源光源宽度较大时, 还会引起相邻码道的窜光, 使波形中增加了不同频率、不同相位的分量, 使波形频谱及相位改变, 主要影响信号的对比度和正弦性。

3 结 论

光电编码器的光源是产生光电信号的重要组成部分, 是生成高质量光电信号的关键因素, 因此在光源的选择上要选择适合码道宽度和编码器整体精度的光源。

文中通过对比分析两种光源对光电信号的影响可以得知: 光源的发散角主要影响光电信号的正交性和正弦性, 光源宽度主要影响光电信号的正弦性。因此得出结论: 为提高编码器的测角精度, 应尽可能选择发散角小、光源宽度小的光源。研究光源参数对光电信号的影响将为今后高精度光电编码器的设计提供重大参考价值。

参 考 文 献:

[1] Wang Xianjun. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoders [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(2): 379-386. (in Chinese)
王显军. 光电轴角编码器细分信号误差及精度分析[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 379-386.

[2] Zhu Yifeng, Mu Yining, Yu Lintao. Method of grating angle detection using slit light battery [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3396-3400. (in Chinese)
朱一峰, 母一宁, 于林韬. 狭缝光电池的栅角检测方法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3396-3400.

[3] Wang Shuai, Wang Jianli, Chen Tao, et al. Application of the nonlinear tracking-differentiator in velocity estimation on optical encoder [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5):849-853. (in Chinese).
王帅, 王建立, 陈涛, 等. 非线性跟踪微分器在光电编码器测速中的应用[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 849-853.

[4] Gao Xu, Wan Qihua, Zhao Changhai, et al. Real-time

compensation of orthogonality deviation for Moiré fringe photoelectric signal [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(1): 213-219. (in Chinese)
高旭, 万秋华, 赵长海, 等. 莫尔条纹光电信号正交性偏差的实时补偿[J]. 光学精密工程, 2014, 22(1): 213-219.

[5] Ye Shengxiang. The Photoelectric Technology of Precise Measuring Displacement[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2003. (in Chinese)
叶盛祥. 光电位移精密测量技术[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003 .

[6] Zhang Shanzhong. The Technology of Metrology Grating [M]. Beijing: China Machine Press, 1985. (in Chinese)
张善锺. 计量光栅技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.

[7] Tu Dawei, Wu Rengmao, Yang Hengliang, et al. Effect of optical structure on output light intensity distribution in LED package [J]. *Opt Precision Eng*, 2008, 6(5): 832-837. (in Chinese)
屠大维, 吴仍茂, 杨恒亮, 等. LED封装光学结构对光强分布的影响[J]. 光学精密工程, 2008, 16(5): 832-837.

[8] Jing Lei, Liu Hua, Zhao Huifu, et al. Compact collimator design for high-brightness light-emitting diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(12): 1222001. (in Chinese)
荆雷, 刘华, 赵会富, 等. 紧凑型高亮度发光二极管准直镜设计[J]. 光学学报, 2011, 31(12): 1222001.

[9] Gao Xu, Wan Qihua, Lu Xinran, et al. Automatic compensation of sine deviation for grating fringe photoelectric signal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0712001. (in Chinese)
高旭, 万秋华, 卢新然, 等. 光栅条纹光电信号正弦性偏差的自动补偿[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0712001.

[10] Wang Xianjun. Errors and precision analysis of subdivision signals for photoelectric angle encoder [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(2): 379-386. (in Chinese)
王显军. 光电轴角编码器细分信号误差及精度分析[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 379-386.

[11] Zhao Changhai. The research of measure method of dynamic interpolation errors of high precision photoelectric encoder [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
赵长海. 高精度光电编码器动态细分误差的测量方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2008.