

文章编号 1004-924X(2011)12-2947-07

## 钢圈反射式光栅信号的补偿

盖竹秋<sup>1,2\*</sup>, 程志峰<sup>1,2</sup>

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;  
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:** 为了提高钢圈反射式光栅的测量精度, 设计了光栅信号补偿系统, 分别对光栅信号的幅值、直流电平和相位进行了补偿, 补偿后两路光栅信号的正交性得到了改善。首先, 根据钢圈反射式光栅提取信号的方式建立光栅信号电子学处理系统。然后, 分别从幅值、直流电平和相位等 3 方面提出系统的补偿算法。以 8 192 lp/mm 的钢圈反射式光栅为平台, 以实际的精度检测结果为评判依据, 对提出的信号补偿系统进行了实验验证。结果表明, 补偿后的光栅精度比补偿前提高了 2.28", 提高幅度达到 50%。实验结果验证了光栅信号补偿方案的可行性。

**关键词:** 钢圈式编码器; 反射式光栅; 传感器; Lissajou 图; 信号补偿

**中图分类号:** TP212.12; TN762 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111912.2947

## Compensation of signal for reflective grating engraved on steel ring

GAI Zhu-qiu<sup>1,2\*</sup>, CHENG Zhi-feng<sup>1,2</sup>

- (1. *Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*  
2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)*  
\* *Corresponding author, E-mail: g aizhuqiue mail@sina.com*

**Abstract:** In order to improve the measuring accuracy of a steel ring reflective grating, a grating signal compensation system is designed. The system is used to compensate the signal amplitude, DC voltage and the phase of the grating, respectively, for which two grating signals have a better orthogonality. First, according to the sampling method for steel ring reflective grating signals, an electronic processing system is created. And then several compensation algorithms are established aiming at the signal amplitude, DC voltage and the phase. By taking the steel ring reflective grating with 8 192 lp/mm as a platform and the results of testing precision as a basis of adjudication, the proposed signal compensation system is verified. The results show that the precision compensated has been improved by 2.28" with an increasing magnitude of 50%. Obtained results prove that the signal compensation system is feasible.

**Key words:** steel ring encoder; reflective grating; sensor; Lissajou diagram; signal compensation

收稿日期: 2011-04-14; 修订日期: 2011-05-19.

基金项目: 武器装备预研基金资助项目 (No. 51460040104ZK1001)

## 1 引言

钢圈反射式光栅是将光栅刻划在金属环外侧环面上的一种光栅,其信号提取采用非接触反射方式。德国 HEIDENHAIN 公司的钢带光栅和英国 RENISHAW 公司钢圈式光栅均是在金属基底上刻划光栅,且均采用反射式提取光栅信号的方法,其多应用在轴系要求中孔直径比较大的地面设备中,如空间探测用望远镜,其测角的分辨力可达  $0.0012''$ 。我国在光学透射式角度传感器方面的研究已经有了 50 多年的历史,测角分辨力可达  $0.07''$ ,测角精度可达  $0.2''$ 。国内大型经纬仪多采用光学轴角编码器作为位置反馈元件,对于金属反射式光栅的应用研究还处于初级阶段<sup>[1]</sup>。

为提高测角精度,通常需要对光栅信号进行插补细分。理想情况下,要求细分输入的两路正弦信号幅值相等,直流电平一致,相位差为  $90^\circ$ ,而实际光栅信号受到轴系精度、光电信号提取精度和电子学处理引入的噪声等多方面因素的影响,提取的光栅信号存在直流分量误差、信号幅值误差、相位误差、谐波分量误差、噪声误差和量化误差等,其中直流分量、信号幅值、相位不正交等引起的误差是影响细分精度的主要因素。以往的文献论述中多采用硬件方法对直流电平和信号幅值进行调节,对于相位的补偿采用事先测量相位差,再通过查表进行补偿<sup>[2-4]</sup>。本文提出对光栅信号的幅值、直流电平和相位差等 3 方面的误差补偿均采用软件计算的方法,基于计算出的偏差量,实时修正误差,使进入细分程序的两路光栅信号具有良好的正交性,以便提高细分的精度。由于钢圈反射式光栅结构是金属圆环形式的,适用于轴系径向尺寸有限,而中孔又相对要求较大的结构设计形式。同时,其抗振性能要大大优于玻璃基底的光栅码盘,克服了玻璃码盘受到大的振动后易碎的致命缺点,具有很高的可靠性,因此应用前景看好。

## 2 光栅构成及工作原理

钢圈反射式光栅的结构如图 1 所示,它由金

属光栅环、非接触式读数头和信号处理电路组成。

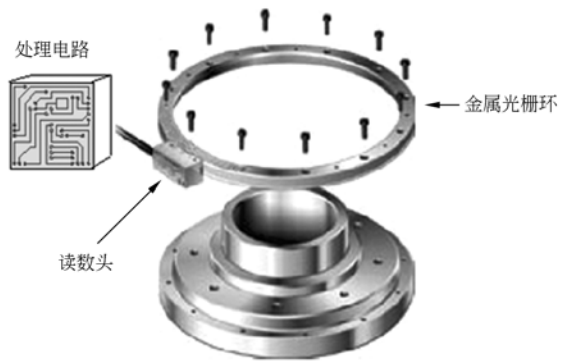


图 1 金属反射式光栅结构示意图

Fig. 1 Structure of reflecting grating engraved on steel ring

光栅是在不锈钢圆环外侧的柱面上镀金后,采用激光光刻的方法刻上光栅暗条纹,剩下的镀金部分组成光栅的亮条纹,并由非接触式的读数头读取光栅莫尔条纹信号,根据信号移动的周期数和在一个周期中信号的相位关系来确定角位移信息。

反射式光栅的读数原理如图 2 所示,读数头中红外发光管发出的光照射到金属环带的光栅上,当光栅环与指示光栅产生相对运动时,将反射的光线切割成强弱变化的莫尔条纹光信号,经光电接收器转换成相位相差  $90^\circ$  的 G0、G90、G180 和 G270 等 4 路电信号。

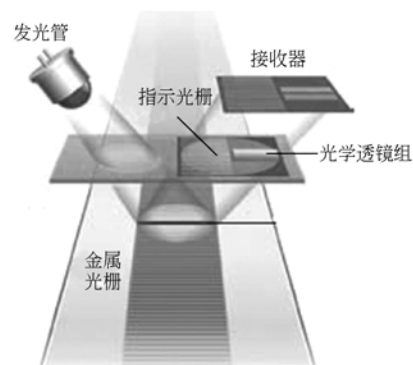


图 2 反射式读数头工作原理

Fig. 2 Principle diagram of reflecting reading core

这些电信号包含了转动轴与不动基础间的相对角度位移信息。如图 3 所示,这 4 路信号经过差分放大形成  $\sin$  和  $\cos 2$  路正弦信号,经过计数逻辑单元,对脉冲采用软件中断方式进行计数;同

时,  $\sin$  和  $\cos$  通过 A/D 转换, 由 CPU 对信号进行补偿和电子学插值细分, 校正处理等得到二进制角度代码, 作为伺服控制系统的位置环的反馈信息<sup>[5-7]</sup>。

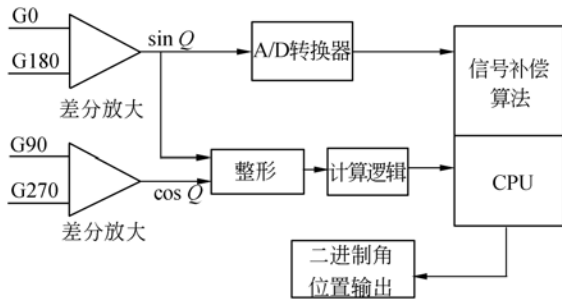


图 3 光栅信号处理框图

Fig. 3 Block diagram of dealing grating signal

### 3 光栅信号的幅值和相位补偿

#### 3.1 光栅信号的幅值补偿

为使金属光栅环具有更高的探测能力, 通常是利用两路正交的光栅信号通过细分达到更高的测角分辨力。细分处理方法基于标准的正弦、余弦两路信号。设正弦、余弦信号的幅值为  $u$ , 其信号的表达式为:

$$u_a = u \sin \theta, \quad (1)$$

$$u_b = u \sin(\theta + 90^\circ) = u \cos \theta. \quad (2)$$

相角的计算表达式为:

$$\theta = \arctan \left( \frac{u_a}{u_b} \right). \quad (3)$$

由于实际光电信号参数(幅值、相位、直流分量等)与处理电路参数的匹配不够精确, 形成非理想的两路信号, 其表达式如下:

$$u_a = u_{a0} + u_{a1} \sin \theta, \quad (4)$$

$$u_b = u_{b0} + u_{b1} \sin(\theta + \phi_b). \quad (5)$$

理想和理想的 Lissajou 图如图 4 所示。

由于算法插值细分依据相角公式(3), 所以由公式(4)和(5)计算的结果必然产生细分误差。细分误差是编码器误差的重要组成部分, 可以分为: 直流分量误差、信号幅值误差、相位误差、谐波分量误差、噪声误差和量化误差。

为减小由于幅值不等和直流分量所带来的误差, 需要对信号的幅值进行修正。由于从读数头

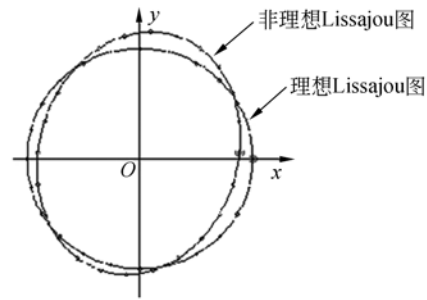


图 4 理想与非理想 Lissajou 图

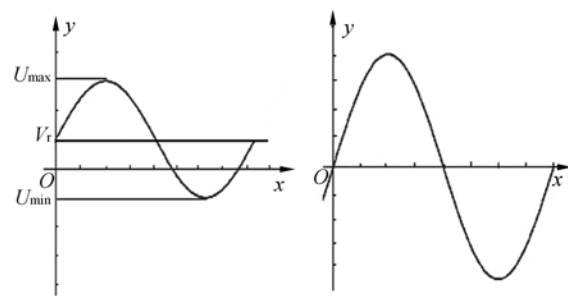
Fig. 4 Ideal and non-ideal Lissajou diagrams

输出的信号没有经过调整, 放大后各路正弦信号幅值和直流电平均不一致, 因此, 需要计算正弦信号的软件放大倍数  $K_{amp}$  和直流电平  $V_r$  两个参数, 以使两路正弦信号  $\sin$  和  $\cos$  通过软件修正后达到幅值和直流电平相等。通过计算机软件采集修正前正弦信号的峰值  $U_{max}$  和谷值  $U_{min}$ , 计算出信号的直流电平修正  $V_r$  和信号的峰峰值放大倍数  $K_{amp}$ , 参数的计算公式如下:

$$V_r = \frac{U_{max} - U_{min}}{2} + U_{min}, \quad (6)$$

$$K_{amp} = \frac{V_{out}}{U_{max} - U_{min}}. \quad (7)$$

用参数  $V_r$  和  $K_{amp}$  重新修订正弦信号。将采集的正弦信号的 A/D 量减去  $V_r$  后再乘上放大倍数  $K_{amp}$ , 使修正后的正弦波达到如图 5(b) 中的标准波形, 从而完成幅值和直流电平的修正。



(a) 补偿前

(b) 补偿后

(a) Before compensation (b) After compensation

图 5 正弦波的补偿

Fig. 5 Compensation of sine wave

#### 3.2 光栅信号的相位补偿

莫尔条纹信号经过差分放大后接近于正弦曲线, 要保证细分的精度, 要求两路信号  $\sin$  与  $\cos$  相位互差  $90^\circ$ , 即保证进入细分的两路正弦信号

具有良好的正交性。但由于光栅环在刻制和安装过程中会出现误差,信号通过差分放大器后相位差不等于  $90^\circ$ ,两路信号不正交会造成 Lissajou 图呈椭圆形。在细分的各项误差中,信号不正交带来的误差最大。

设两路正弦信号  $\sin$  和  $\cos$  相位偏差为  $\varphi$ ,即相位差为  $90^\circ - \varphi$ ,其表达式如下:

$$u_a = u \sin \theta, \quad (8)$$

$$u_b = u \cos (\theta + \varphi). \quad (9)$$

如图 6 所示,以  $\sin$  路信号作为基准信号,认为  $\cos$  路信号落后于理想信号相位  $\varphi$ 。在进行细分计算之前将  $\cos$  路信号的相位做提前补偿,从而使两路信号正交。

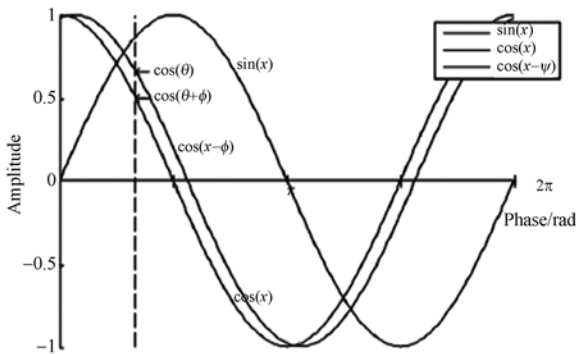


图 6 相位补偿原理

Fig. 6 Principle of compensation for phase

由泰勒公式:

$$f(x+x_0) = f(x) + f'(x) x_0 + \frac{f''(x)}{2!} x_0^2 + \dots + \frac{f^n(x)}{n!} x_0^n, \quad (10)$$

将  $\cos(\theta+\varphi)$  按公式(10)展开得:

$$\cos(\theta+\varphi) = \cos \theta - \sin \theta \cdot \varphi - \frac{\cos \theta}{2} \cdot \varphi^2 \dots, \quad (11)$$

当相位差  $\varphi < 15^\circ$  (即  $\varphi < 0.26 \text{ rad}$ ) 时,二阶分量的值已经很小了,为简化运算,取一阶算法:

$$\cos(\theta+\varphi) = \cos \theta - \sin \theta \cdot \varphi, \quad (12)$$

则  $\cos \theta = \cos(\theta+\varphi) + \sin \theta \cdot \varphi$ ,并将相位修正后的  $\cos \theta$  信号带入相角计算公式(3)中。

实际工作时, $\sin \theta$  和  $\cos(\theta+\varphi)$  可由 A/D 转换器采集得到,相位差  $\varphi$  采用 Lissajou 图形分析技术,根据其特殊点模长计算得出。

首先根据采集到的数据画出 Lissajou 图形,并计算图形上各采样点距离中心点的模长。如图 7 所示,利用软件插值找到长轴 A、短轴 B 的模长。

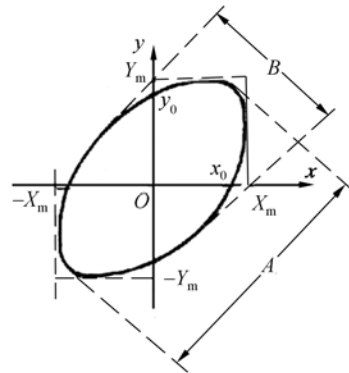


图 7 相位差求解示意图

Fig. 7 Diagram of calculating phase error

当两路信号的相位偏离  $90^\circ$  时,Lissajou 图是椭圆形,其长短半轴之比与相位差的反正切成正比,根据式(13)计算出相位差<sup>[8-13]</sup>:

$$\varphi = 2 \arctan \frac{B}{A}. \quad (13)$$

## 4 实验与结果

### 4.1 实验方案

以刻线为  $8192 \text{ lp/mm}$  的金属光栅环为实验对象,经过脉冲计数和莫尔条纹电子学插值细分(细分 512 份)后形成具有 21 位分辨力的角位置信息。如图 8 所示,采用平行光管和 17 面棱体组合检测精度法,检测光栅的测角精度。

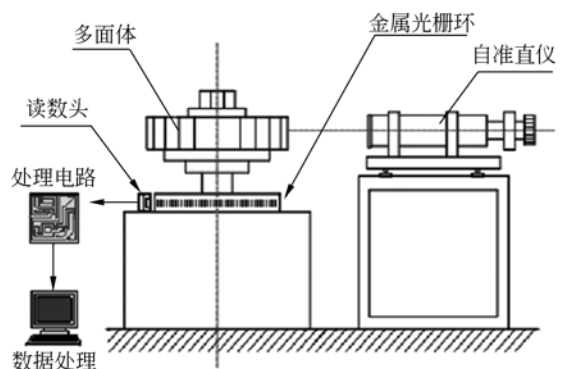


图 8 精度检测原理图

Fig. 8 Principle diagram of measuring precision

为了验证光栅信号补偿算法的可行性,采用两套软件方案,一套不带光栅信号补偿算法,另一套带光栅信号补偿算法,并将两套算法植入同一实验平台上,通过比较精度检测的结果来验证信号处理算法的可行性和正确性。

4.2 精度检测结果

将钢圈反射式光栅安装在主轴上,调整好读数头与金属光栅之间的位置,并固定读数头。DLT-17 型多面体棱镜安放在主轴的回转中心上,其一个反射面的法线应与光栅的零位大致重合,然后将自准直仪对准这一反射面,用微动装置调到零位转换点,从自准直仪的数显箱读取一个数,然后继续转动金属光栅至第二个检测点,读取第二个数。以此类推,读取 17 个面的数据,它们与理论值的差,就是光栅的测角误差。

表 1 为未加入信号补偿算法时精度检测结果,经计算标准差  $1\sigma=4.51''$ 。

表 1 补偿前的精度检测结果

Tab.1 Measuring precision before compensation

多面体 序号	检测点 角度	光管 读数/( $''$ )	多面体修 正值/( $''$ )	误差/( $''$ )
0	0° 0' 0''	0	0	0
1	21° 10' 35''	4.3	-1.1	5.4
2	42° 21' 11''	4.7	0.4	4.3
3	63° 31' 46''	7.4	0.4	7.0
4	84° 42' 21''	4.3	0.6	3.7
5	105° 52' 57''	-9.5	0.5	-10
6	127° 3' 32''	8.3	-0.4	8.7
7	148° 14' 7''	8.4	-0.7	9.1
8	169° 24' 42''	4.8	-0.4	5.2
9	190° 35' 18''	7.2	-1.3	8.5
10	211° 45' 53''	-2	0.4	-2.4
11	232° 56' 28''	3.1	-0.9	4.3
12	254° 7' 4''	7.9	-0.2	8.1
13	275° 17' 39''	4.9	-0.8	5.7
14	296° 28' 14''	3.6	0.7	2.9
15	317° 38' 49''	1.4	-1.6	3
16	338° 49' 25''	-1.8	0.2	-2.0
17	0° 0' 0''	3.7	0	3.7

表 2 为加入信号补偿算法后的精度检测结果,经计算标准差  $1\sigma=2.23''$ ,比加入信号补偿前的精度提高了  $2.28''$ 。

表 2 补偿后的精度检测结果

Tab.2 Measuring precision after compensation

多面体 序号	检测点 角度	光管 读数/( $''$ )	多面体 修正值/( $''$ )	误差/( $''$ )
0	0° 0' 0''	0	0	0
1	21° 10' 35''	2.1	-11	3.2
2	42° 21' 11''	2.6	0.4	2.2
3	63° 31' 46''	4.7	0.4	4.3
4	84° 42' 21''	2.2	0.6	1.6
5	105° 52' 57''	-4.9	0.5	-5.4
6	127° 3' 32''	3.8	-0.4	4.2
7	148° 14' 7''	3.9	-0.7	4.6
8	169° 24' 42''	2.1	-0.4	2.5
9	190° 35' 18''	2.7	-1.3	4
10	211° 45' 53''	-1.1	0.4	-1.5
11	232° 56' 28''	1.4	-0.9	2.3
12	254° 7' 4''	2.9	-0.2	3.1
13	275° 17' 39''	2.4	-0.8	3.2
14	296° 28' 14''	1.3	0.7	0.6
15	317° 38' 49''	0.5	-1.6	2.1
16	338° 49' 25''	-0.8	0.2	-1
17	0° 0' 0''	1.5	0	1.5

由上述的测量结果可知,本系统中所采用的光栅信号补偿算法对于正弦信号的幅值、直流电平和相位差的补偿起到了明显的作用。通过对比光栅信号补偿前后的 Lissajou 图形,更能直观地看到补偿的效果。

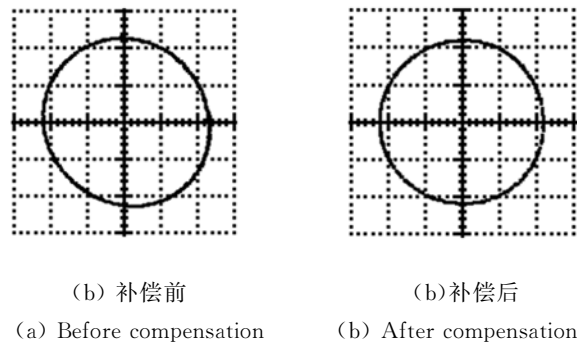


图 9 光栅信号补偿的 Lissajou 图

Fig.9 Lissajou diagrams of compensating grating signal

5 结 论

本文通过对金属光栅环信号提取方式的论述及光栅信号质量对光栅细分精度影响的分析,提出对信号幅值、直流电平和相位差等进行补偿的

系统和方法。对 8 192 lp/mm 的金属反射式光栅做了补偿对比实验,结果表明经过补偿的信号其

测量精度提高了 2.28",为 50%左右,验证了补偿算法的正确性和可行性。

#### 参考文献:

- [1] 董莉莉,熊经武,万秋华. 光电轴角编码器的发展动态[J]. 光学精密工程,2000,8(2):198-202.  
DONG L L, XIONG J W, WAN Q H. Development of photoelectric rotary encoders [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(2):198-202. (in Chinese)
- [2] 罗长洲,孙岩. 码盘偏心对叠栅条纹信号相位影响理论分析[J]. 光学学报,2003,23(8):1013-1016.  
LUO CH ZH, SUN Y. Theoretical analysis on phase of moire fringes signal affected by shaft eccentricity[J]. *Journal of Optics*, 2003, 23(8):1013-1016. (in Chinese)
- [3] 罗长洲. 码盘偏心对叠栅条纹信号相位的影响 [J]. 光子学报,2003,32(10):1271-1273.  
LUO CH ZH. The affect on phase of moire fringes signal caused by shaft eccentricity [J]. *Journal of Photon*, 2003, 32(10):1271-1273. (in Chinese)
- [4] 熊文卓,孔智勇,张炜. 光电轴角编码器光电信号正交性偏差的相量校正方法[J]. 光学精密工程,2007,15(11):1745-1748.  
XIONG W ZH, KONG ZH Y, ZHANG W. Phase correction of quartering deviation of photoelectric rotary encoder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11):1745-1748. (in Chinese)
- [5] 郝杰,续志军. 反射式金属光栅在高精度转台上的应用[J]. 仪器仪表与传感器,2008,24(11-1):120-121.  
HAO J, XU ZH J. The application of reflexible metal grating on high precision turntable[J]. *Journal of Instrument Technique and Sensor*, 2008, 24(11-1):120-121. (in Chinese)
- [6] 周翠花. 反射式金属光栅盘研制[D]. 成都:电子科技大学,2006.  
ZHOU C H. *Research on reflective metallic grating* [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2006. (in Chinese)
- [7] 余光清. 反射式光电轴角编码器的研究[D]. 成都:电子科技大学,2007.  
YU G Q. *Research on reflexible photoelectric rotary encoder*[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007. (in Chinese)
- [8] 孔智勇. 提高绝对式光电轴角编码器精度和分辨力的方法的研究[D]. 长春:长春光学精密机械与物理研究所,2003.  
KONG ZH Y. *Study on techniques of increasing the accuracy and resolution for the absolute photoelectric rotary encoder*[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2003. (in Chinese)
- [9] 楚兴春,吕海宝,杜列波,等. 任意相位差条纹信号细分方法的研究[J]. 光学学报,2005,25(4):497-500.  
CHU X CH, LV H B, DU L B, *et al.*. Research on subdividing method for random phase difference fringe signals[J]. *Journal of Optics*, 2005, 25(4):497-500. (in Chinese)
- [10] 李江国,宣明,王一凡. 莫尔条纹细分中相位误差的软件补偿方法[J]. 光学精密工程,1995,3(1):69-73.  
LI J G, XUAN M, WANG Y F. Software compensation method of phase error in moiré strip division [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1995, 3(1):69-73. (in Chinese)
- [11] 景芳盛,陈桂龙,郝伟. 光栅莫尔条纹信号正交误差的补偿[J]. 计量学报,1996,17(1):45-48.  
JING F SH, CHEN G L, HAO W. Phase quadrature error compensation of moiré fringe signals [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 1996, 17(1):45-48. (in Chinese)
- [12] 余文新,胡小唐,邹自强. 一种高分辨力和高频响的光栅纳米测量细分方法[J]. 天津大学学报,2002,35(1):1-4.  
YU W X, HU X T, ZHOU Z Q. A subdivision method with high resolution and high response speed in grating-based nanometrology[J]. *Journal of Tianjin University*, 2002, 35(1):1-4. (in Chinese)

- [13] 吕孟军. 光栅莫尔条纹电子学细分技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.  
LV M J. *Study of electronic subdivision for grat-*

*ing moiré fringe*[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)

#### 作者简介:



盖竹秋(1973—),男,吉林长春人,副研究员,1998年于吉林大学获得学士学位,2005年于中科院研究生院获得硕士学位,主要从事光电侦查平台伺服控制系统的研究。E-mail: gaizhuqiue-mail@sina.com



程志峰(1979—),男,山东临沂人,博士,助理研究员,2005年于大连理工大学获得硕士学位,2011年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电仪器结构设计及优化分析等方面的研究。E-mail: chengzhif2004@yahoo.com.cn

#### ●下期预告

## 面向光纤熔融拉伸的电磁力施加装置设计与实验

荣伟彬,关楠楠,王乐锋,孙立宁

(哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150080)

为实现对超细径光纤熔融拉伸力的精确控制,设计了相应的电磁力施加装置。首先采用有限元方法分析不同线圈参数下电磁线圈与永磁铁之间电磁力的数值大小,获得电磁力与线圈各参数间的数学关系式。然后以性能要求及线圈骨架的外形尺寸为限制条件,建立约束方程及目标函数进行优化求解,得到最优参数。在依据优化参数制作电磁线圈的基础上,设计了电磁力控制电路,通过调节线圈电流精确控制电磁力。最后,进行电磁力施加装置性能实验,实验结果表明:光纤拉伸力的范围达到 2.660 g;光纤拉伸力的分辨率达到 0.762 5 mg,满足超细径光纤熔融拉伸对拉伸力范围及分辨率的要求。