

变栅距光栅角位移传感器分辨率分析

王东辉 刘林 郑普超* 李秉实 包艳 张兵 张超

(中国航空工业集团公司西安飞行自动控制研究所, 陕西 西安 710065)

摘要 对影响变栅距光栅角位移传感器分辨率的因素进行了分析研究。推导出传感器分辨率的计算公式,并讨论了传感器分辨率与各参量之间的关系及提高分辨率的方法。针对衍射级次对分辨率的影响进行了理论分析和验证。证明了变栅距光栅角位移传感器分辨率与光栅栅距的定量变化关系并进行了仿真验证。为变栅距光栅角位移传感器设计优化提供了理论指导和计算方法。

关键词 光栅;变栅距光栅;分辨率;光栅衍射

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.060501

Resolution Analysis of Varied Line-Space Grating Angular Displacement Sensor

Wang Donghui Liu Lin Zheng Puchao Li Bingshi Bao Yan
Zhang Bing Zhang Chao

(Flight Automatic Control Research Institute, Aviation Industry Corporation of China,
Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract The factors affecting the resolution of varied line-space grating angular displacement sensor are analyzed. The calculation formula of the sensor resolution is deduced, in addition, the relation between the parameters and the method of improving the resolution are discussed. Besides, it is theoretically analyzed and verified that the diffraction order has influence on the resolution. The relationship between the resolution and the grating space of the varied line-space grating angular displacement sensor is proved, as well as simulated and verified. Theoretical guidance and calculation method are thereby provided for the design and optimization of the varied line-space grating angular displacement sensor.

Key words gratings; varied line-space grating; resolution; diffraction grating

OCIS codes 050.1950; 060.2370; 120.4640

1 引言

变栅距光栅角位移传感器是新一代战斗机机载位移传感器领域的研究热点之一。它利用变栅距光栅对宽带光谱的带通滤波功能,采用柱面变栅距光栅实现波长对角度位移的编码^[1]。变栅距光栅角位移传感器具有灵敏度高、结构简单和抗电磁干扰等优点,已于20世纪90年代在国外航空机载领域获得试飞验证。而国内对于该传感器的研究尚处于起步阶段^[2~7],因此开展变栅距光栅角位移传感器的分辨率分析具有重要意义^[8,9]。本文以光栅衍射理论为基础,分析了影响变栅距光栅角位移传感器精度的主要因素,并通过试验和仿真进行了改进和验证,使得变栅距光栅角位移传感器精度得到较大提高。

收稿日期: 2013-02-24; **收到修改稿日期**: 2013-03-22; **网络出版日期**: 2013-05-14

基金项目: 总装基金(61901120106)和中航工业创新基金(2009D61864)资助课题。

作者简介: 王东辉(1969—),男,博士研究生,主要从事航空微特电机及光位移传感器技术等方面的研究。

E-mail: dhwangonfacri@126.com

导师简介: 刘林(1963—),男,研究员,主要从事飞行控制、控制率评估确认和稳健性控制等方面的研究。

E-mail: liul@avic.com

* **通信联系人**。E-mail: fox0911@126.com

2 变栅距光栅角位移传感器原理

变栅距光栅的光栅常数随光栅长度按一定规律变化,当平面宽带平行光垂直照射变栅距光栅时,在给定 θ 衍射角方向上的光谱中心波长将随栅距 d 变化,即光栅位置与衍射光谱中心波长一一对应。通过测量光谱中心波长值可以推算出光栅的位移量,此为变栅距光栅用作位移传感器的基本原理。平面变栅距光栅的波长位移编码原理如图 1 所示。图中 d_0 为起始栅距, X 为沿光栅长度的位置, d_n 为沿光栅长度的位置 X 处的栅距, G 为栅距随光栅长度的变化率, θ 为衍射角。

变栅距光栅角位移传感器是在平面变栅距光栅的基础上进行柱面成型而成,其结构如图 2 所示。

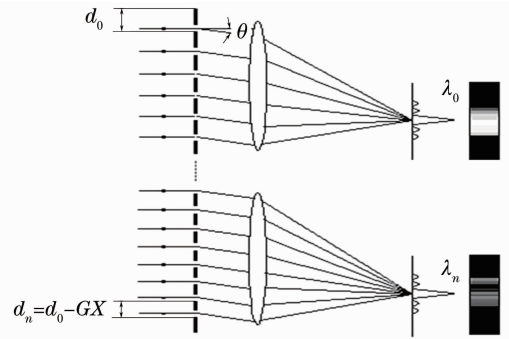


图 1 变栅距光栅波长位移编码原理图
Fig. 1 Wavelength encoding principle of varied line-space grating

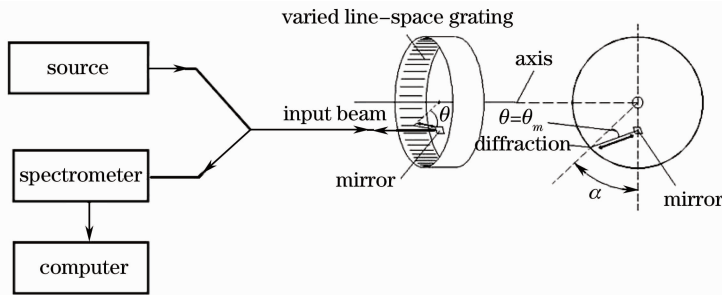


图 2 变栅距光栅角位移传感器构成

Fig. 2 Structure of the varied line-space grating angular displacement sensor

柱面变栅距光栅的栅距 d 沿圆柱面弧长与转角 α 成线性关系:

$$d = d_0 - GR\alpha \quad (0 \leq \alpha \leq \alpha_N), \quad (1)$$

式中 d 为柱面光栅的任意栅距, d_0 为起始栅距, G 为栅距随弧长的变化率, R 为柱面变栅距光栅半径, α 为角位移。宽带光通过 Y 型光纤中的一根光纤以入射角 θ 准直入射到柱面变栅距光栅,其衍射角以 $\theta_m = \theta$ 为准直衍射,返回的衍射光通过 Y 型光纤中的另一根光纤传输到光谱仪中得到窄带衍射波形,光谱仪将窄带光信号传输至计算机进行处理得到中心波长,再由中心波长与位移的对应关系得到相应位移。

衍射窄带光的中心波长 λ 与光域内变栅距光栅的中央栅距 d 的关系满足光栅方程

$$2d \sin \theta = k\lambda \quad (k = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots). \quad (2)$$

取光栅正一级衍射信号,由(1)式和(2)式可得到角位移 α 与衍射光中心波长 λ 呈线性关系:

$$\alpha = \frac{d_0}{RG} - \frac{\lambda}{2RG \sin \theta}. \quad (3)$$

假设光谱仪波长解调精度远高于传感器,这样通过由光谱仪采集的衍射光的中心波长值即可准确计算出传感器的角度位移^[10,11]。

3 波长分辨率与各参量关系公式推导

变栅距光栅角位移传感器是一种波长编码传感器,其分辨率表明传感器分开波长极为接近的两条谱线的能力,这是波长编码传感器非常重要的性能指标。变栅距光栅角位移传感器分辨率受光源入射孔径、光栅元件参数及准直成像透镜等多重因素影响。变栅距光栅角位移传感器结构原理如图 3 所示。

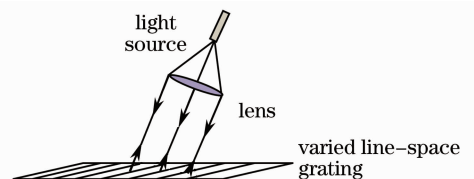


图 3 变栅距光栅角位移传感器结构原理示意图
Fig. 3 Schematic of varied line-space grating angular displacement sensor

以理想白光作为入射光源,由于通常准直入射光域和变栅距光栅栅距随弧长的变化率 G 都很小,此时柱面变栅距光栅分辨率规律可采用平面等栅距光栅分辨率规律分析方法代替。

根据瑞利准则,当两条强度分布轮廓相同的谱线 λ_1 的最大值和 λ_2 的最小值相重叠时,它们刚好能被分辨。由于入射光为自准直入射,入射孔径与出射孔径相同,设其值为 S ,当 $S \rightarrow 0$ 时,其理论最大分辨率为^[12,13]

$$R_e = \frac{\bar{\lambda}}{\Delta\lambda} = \frac{(\lambda_1 + \lambda_2)/2}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad (4)$$

式中 $\bar{\lambda}$ 为两谱线平均波长, $\Delta\lambda$ 为两谱线波长差。实际上 S 具有一定的值,不可忽略,则谱线会因为孔径的宽度而展宽, λ_1 和 λ_2 的值不能被分辨。此时入射孔径造成的光谱增宽可表示为

$$\lambda_{\Delta 1} = \frac{S}{(dl/d\lambda)} \cdot \frac{f_2}{f_1} \cdot \gamma, \quad (5)$$

出射孔径造成的光谱增宽为可表示为

$$\lambda_{\Delta 2} = \frac{S}{(dl/d\lambda)}, \quad (6)$$

式中 f_1 、 f_2 分别为准直、成像物镜的焦距, γ 为色散系统横向放大率, $dl/d\lambda$ 为线色散。在该传感器系统中光路结构为自准直光路,则 $f_1 = f_2 = f$, $\gamma = \frac{\cos \theta_1}{\cos \theta_2} = 1$,代入(5)、(6)式得 $\lambda_{\Delta 1} = \lambda_{\Delta 2} = S/(dl/d\lambda)$,所以由光纤孔径宽度引起的出射光谱增宽为

$$\lambda_{\Delta} = \lambda_{\Delta 1} + \lambda_{\Delta 2} = 2S/(dl/d\lambda). \quad (7)$$

由以上可知,根据瑞利准则,谱线展宽后 λ_2 谱线需右移 $\lambda_{\Delta}/2$ 两谱线才刚好能被分辨。设谱线右移 $\lambda_{\Delta}/2$ 后得到的新谱线为 λ'_1 和 λ'_2 ,则有

$$\lambda'_1 = \lambda_1, \lambda'_2 = \lambda_2 + \lambda_{\Delta}/2. \quad (8)$$

此时传感器实际波长分辨率为

$$R'_e = \frac{\lambda'}{\Delta\lambda'} = \frac{(\lambda'_1 + \lambda'_2)/2}{\lambda'_2 - \lambda'_1} = \frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{\Delta}/2)/2}{\lambda_2 + \lambda_{\Delta}/2 - \lambda_1}, \quad (9)$$

其中平面光栅线色散为

$$\frac{dl}{d\lambda} = \frac{kf}{d \cos \theta}. \quad (10)$$

结合(7)、(9)、(10)式可得传感器实际分辨率为

$$R'_e = \frac{2\lambda k f + S d \cos \theta}{2\Delta\lambda k f + 2S d \cos \theta}. \quad (11)$$

4 波长分辨率与各参量关系分析

由(11)式对各参量求导可以得出传感器分辨率与各参量之间定性的变化关系^[14]。

1) $\frac{dR'_e}{dS} < 0$, 传感器分辨率随光纤孔径的增大而减小。在变栅距光栅角位移传感器中,光纤芯径即为以上分析中的孔径,在其他参数不变的情况下,通过减小光纤芯径可提高传感器分辨率。然而在变栅距光栅角位移传感器中光源强度始终不变,减小光纤芯径虽然可以改善光束的准直特性,对分辨率有一定好处,但同时会使出射光通量减小,光谱解调时间过长,导致传感器动态响应不能满足使用要求。需通过多次试验确定 ϕ_{\min} 值(满足传感器信号前提下光纤孔径的最小值)作为传感器设计参数中一个常量。

2) $\frac{dR'_e}{df} > 0$, 变栅距光栅角位移传感器中,在其他参数不变的情况下,传感器分辨率随光路系统中准直成像透镜焦距的增大而增大。但是由于受到传感器规格尺寸限制,光路结构不可能过大,所以光路中焦距 f_{\max} 需根据传感器尺寸等实际情况确定。

3) $\frac{dR'_e}{d\theta} > 0$, 变栅距光栅角位移传感器中,在其他参数不变的情况下,传感器分辨率随光路系统中光的入射角度或衍射角度的增大而增大。光栅入射角和衍射角相同,其角度取值范围均在 $(0^\circ, 90^\circ)$ 。

4) $\frac{dR'_e}{dk} > 0$, 变栅距光栅角位移传感器中, 在其他参数不变的情况下, 传感器分辨率随光谱级次 k 的增大而增大。采用高光谱级次, 即增大 k 值也可以提高分辨率, 但在光源及光栅不变的情况下, 采用高级次光谱会使光强减小。

5) $\frac{dR'_e}{dd} < 0$, 变栅距光栅角位移传感器中, 在其他参数不变的情况下, 传感器分辨率随光域内光栅平均栅距 d 的增大而减小。当光谱级次固定时, 减小光域内柱面光栅栅距 d 也可以提高传感器分辨率。

以上分析得出了提高变栅距光栅角位移传感器分辨率的几种方法, 其中光栅衍射级次 k 与光栅栅距 d 是提高变栅距光栅角位移传感器精度的两个因素, 但两个因素存在一定的相互制约关系。

由光栅衍射相关知识可知平面光栅分辨率^[15]

$$r = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = kN, \quad (12)$$

式中 N 为光域内光栅周期数, 在变栅距光栅传感器中 $N = W/d_n$, 其中 W 为光域宽度, d_n 为光域照射在光栅任意位置处的中心栅距。所以在变栅距光栅角位移传感器中, 其分辨率随测量位置不同而变化。

在自准直条件下由(2)式得

$$\theta = \arcsin \frac{k\lambda}{2d}, \quad (13)$$

取正衍射级次 $\theta < 90^\circ$, 所以有

$$\frac{k\lambda}{2d} < 1, \quad (14)$$

则

$$k < \frac{2d}{\lambda}, \quad (15)$$

λ 为传感器使用波长, $400 \text{ nm} < \lambda < 800 \text{ nm}$ 。

5 实验与仿真验证

角位移传感器各项部件经过改进完善之后进行了常温调试试验, 整个调试系统包括传感器本体、卤钨灯光源、HR4000 光谱仪、分度头、Y 型光纤和计算机等设备及相关软件。变栅距光栅角位移传感器采用的光纤孔径为 $200 \mu\text{m}$, 透镜焦距 7.8 mm , 光域宽度 1 mm , 自准直入射角 20° , 将以上参数代入(2)式和(10)~(12)式, 计算得到传感器在一级光谱 684 nm 处的理论波长分辨率为 $R'_e = 28.1$, 将衍射级次改为 2 级衍射后, 自准直入射角变为 43.17° , 光斑位置及其他条件不变, 则传感器在二级光谱 684 nm 处的理论波长分辨率为 $R'_e = 71$ 。传感器在光栅二级衍射条件下是一级衍射波长分辨率的 2.5 倍。

5.1 传感器角分辨率与波长分辨率关系及实验验证

根据光栅衍射级次与变栅距光栅角位移传感器分辨率的关系, 由(3)、(4)式可知变栅距光栅角位移传感器工程样机角分辨率和其波长分辨率成比例关系:

$$\Delta\alpha \propto \frac{1}{R'_e}. \quad (16)$$

上式表明在测量条件和解调算法均不变的情况下, 传感器波长分辨率越高则角分辨率越高, 测量精度也就越高。通过调整传感器自准直光入射角度将一级衍射改为二级衍射, 实测结果该传感器采用光栅二级衍射光分辨率是一级的 2.5 倍, 符合分辨率与衍射级次关系, 一级和二级衍射光谱信号分别如图 4(a)、(b) 所示。经测试变栅距光栅角位移传感器工程样机采用一级衍射信号时, 整机测试精度为 $0.27\% F.R$ (表示传感器满量程的线性度为 0.27%)^[16]; 在角度位移测试范围、传感器时间常数和测试光强足够的条件下, 改进后采用二级衍射信号时, 整机测试精度为 $0.11\% F.R$, 精度提高到原一级的 2.5 倍, 符合上述分辨率与衍射级次的理论定量计算关系。

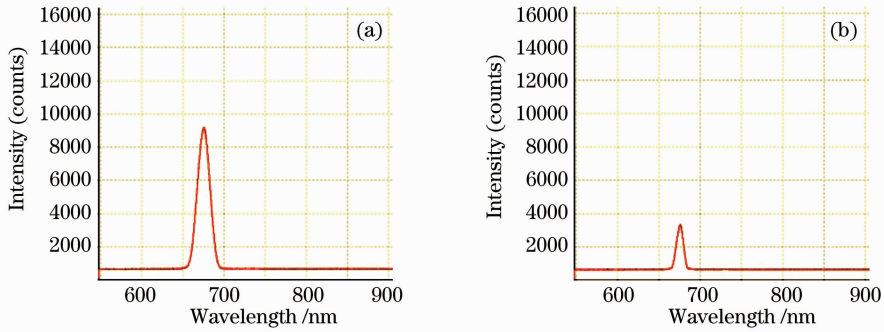


图4 衍射光谱信号对比。(a)一级衍射;(b)二级衍射

Fig. 4 Comparison of diffraction spectral signal in different orders. (a) The first-order diffraction; (b) the second-order diffraction

5.2 光栅栅距与传感器波长分辨率的关系仿真实验

根据第4节传感器波长分辨率与各参量关系的分析可知:减小光纤芯径可提高传感器波长分辨率,但同时会使出射光通量减小;增大传感器光路中透镜焦距和自准直角度也可以提高传感器波长分辨率,但会增大传感器体积;增大衍射级次可提高传感器波长分辨率,但会使衍射光强度下降;只有减小光栅栅距 d 才可在改善传感器波长分辨率的同时不存在负面影响。

变栅距光栅角位移传感器所使用的柱面变栅距光栅制作及成型是一项技术复杂、制作难度大和周期长的工作,由于各种因素制约,本文先从理论分析和仿真入手,证明光栅栅距 d 与变栅距光栅角位移传感器波长分辨率的关系。

将(2)式和(12)式代入(11)式,整理可得

$$R'_c = \frac{2kfW + (1/2)kSW \cot \theta}{2fd + kSW \cot \theta}. \quad (17)$$

将上文中参数代入(17)式,并利用软件进行仿真得出传感器分辨率 R'_c 与栅距 d 的关系曲线,如图5所示。

由图5可以看出,传感器分辨率随着传感器使用光栅的栅距增大而减小。所以在制作传感器用变栅距光栅时,尽量将光栅的线密度做得较密,从而在一定程度上提高传感器的分辨率。但在光栅制作过程中由于工艺原因光栅线密度不能做得太大,一般最高在 2000 line/mm。

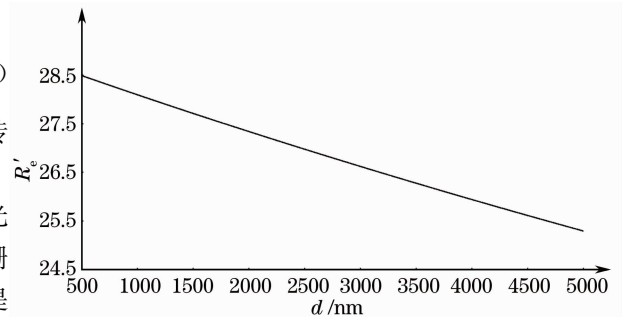


图5 角位移传感器分辨率 R'_c 与栅距 d 关系曲线

Fig. 5 Relationship between R'_c and d of the angular displacement sensor

6 结 论

对影响变栅距光栅角位移传感器精度的因素进行了分析研究。推导出变栅距光栅角位移传感器分辨率与入射光纤芯径、衍射级次及光栅栅距等参量之间的计算公式。讨论了衍射级次和光栅栅距对分辨率的影响和两者之间的制约关系。针对衍射级次对分辨率的影响进行了分析和验证,实验证明传感器使用光栅二级衍射相比一级衍射可使其分辨率提高至原来的 2.5 倍。在光栅栅距对传感器分辨率的影响方面做了理论仿真,证明了传感器分辨率与光栅栅距之间的定量变化关系。这些结果为变栅距光栅角位移传感器的设计优化提供了理论指导和计算方法。

参 考 文 献

- 1 W. B. Spillman, Jr., R. D. La Clair, R. E. Rudd *et al.*. Wavelength encoding long stroke fiber optic linear position sensor for actuator control applications[C]. *SPIE*, 1995, **2467**: 187~194
- 2 Sui Yuxing. An overview on fly-by-light (FBL)[J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2002, **15**(6): 35~38
随子行. 光传操纵系统综述[J]. *光电子技术与信息*, 2002, **15**(6): 35~38
- 3 Li Kun, Wang Shaoping. Development of fly-by-light control system[J]. *J. Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, **29**(12): 1068~1072

- 李 昆, 王少萍. 光传操纵系统的发展趋势[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, **29**(12): 1068~1072
- 4 Li Aijun, Yan Jianguo, Wang Xinmin. Key technique for implementing fly-by-light control systems[J]. *Flight Dynamics*, 2004, **22**(1): 6~9
- 李爱军, 闫建国, 王新民. 光传飞控系统实现的关键技术[J]. 飞行力学, 2004, **22**(1): 6~9
- 5 Shi Lun, Hao Defu. Theory and applications of varied line-space gratings[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, **9**(3): 284~287
- 时 轮, 郝德阜. 变栅距衍射光栅的原理及应用[J]. 光学精密工程, 2001, **9**(3): 284~287
- 6 Ma Weitao, Zhou Jun, Huang Shuiping *et al.*. Characteristic of subwavelength dielectric grating with metal layer and its sensing applications[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0905008
- 马伟涛, 周 骏, 黄水平 等. 金属膜衬底上亚波长介质光栅结构的特性及传感应用[J]. 中国激光, 2011, **38**(9): 0905008
- 7 Wang Qingwei, Liu Yueming, Tian Weijian *et al.*. Review and progress on sensing signal interrogation techniques of long-period fiber gratings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, **49**(8): 080004
- 王清伟, 刘月明, 田维坚 等. 长周期光纤光栅传感信号解调技术研究现状[J]. 激光与光电子学进展, 2012, **49**(8): 080004
- 8 Liu Honglin, Zhang Zaishi, Yu Xiangdong *et al.*. Reseach on spatial resolution of the 30 km distributed optical fiber temperature sensor[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2005, **26**(11): 1195~1199
- 刘红林, 张在室, 余向东 等. 30 km 分布光纤温度传感器的空间分辨率研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, **26**(11): 1195~1199
- 9 Li Enbang, Peng Gangding, Yao Jianquan. Low-cost high-resolution wavelength demodulator for multi-channel dynamic FBG sensing[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2007, **28**(1): 1~6
- 李恩邦, 彭刚定, 姚建铨. 用于光纤光栅传感的低成本高分辨率多通道波长解调仪[J]. 仪器仪表学报, 2007, **28**(1): 1~6
- 10 W. B. Spillman, Jr., R. E. Rudd, F. G. Hoff *et al.*. Wavelength encoded fiber optic angular displacement sensor[C]. *SPIE*, 1990, **1367**: 197~203
- 11 Li Bingshi, Wu Zhong. Position error and compensator for wavelength encoding fiber optic sensor[J]. *Signal Process & System*, 2004, (11): 32~35
- 李秉实, 吴 忠. 波长编码光纤线位移传感器的位移误差及补偿[J]. 信号与系统, 2004, (11): 32~35
- 12 Li Quanchen, Jang Yuejuan. Principle of Spectrograph[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1999
- 李全臣, 蒋月娟. 光谱仪器原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999
- 13 Wu Jianfen, Zhao Lei, Chen Yongyan *et al.*. Flat-field concave holographic grating with broad spectral region and high resolution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(4): 0409002
- 武建芬, 赵 雷, 陈永彦 等. 宽谱高分辨平场凹面全息光栅光谱仪设计[J]. 光学学报, 2012, **32**(4): 0409002
- 14 Wang Xingquan, Feng Kecheng, Zhu Guoxian *et al.*. Calculating equations for resolution and wavelength range of grating spectrograph[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(5): 1167~1170
- 王兴权, 冯克成, 朱国贤 等. 光栅光谱仪分辨率及波长范围计算公式的研究[J]. 光子学报, 2009, **38**(5): 1167~1170
- 15 Zhao Kaihua, Zhong Xihua. Optics[M]. Beijing: Peking University Press, 2001
- 赵凯华, 钟锡华. 光学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2001
- 16 Bao Yan, Yang Dexing, Li Bingshi *et al.*. A precision analysis and process implementation of the angular displacement sensor based on flexible varied line-space grating[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(8): 1860~1865
- 包 艳, 杨德兴, 李秉实 等. 一种研制变栅距光栅角位移传感器的工艺方法[J]. 光学精密工程, 2011, **19**(8): 1860~1865