

平场全息凹面光栅结构参量误差之间的补偿作用

孔 鹏^{1,2} 唐玉国¹ 巴音贺希格^{1*} 李文昊¹ 谭 鑫¹ 崔锦江³

¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033
² 中国科学院研究生院, 北京 100049
³ 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163

摘要 平场全息凹面光栅的制作和使用中不可避免地存在结构参量误差,包括曲率半径误差、制作结构误差以及使用结构误差。利用光线追迹方法研究了像宽随波长的变化曲线与子午焦线的对应变化关系,有助于光谱仪的设计和装调。通过分析各种结构参量误差对像宽曲线的影响发现,在较大误差范围内,光栅参量误差对子午焦线的影响作用为平移作用和倾斜作用。数值计算结果显示,光栅结构参量误差之间存在普遍的补偿作用,误差补偿之后光栅的成像质量能够达到与设计结果相近的水平。

关键词 衍射与光栅;全息术;光栅设计;误差补偿

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0705001

Compensation Effects between Parameter Errors of Flat-Field Holographic Concave Gratings

Kong Peng^{1,2} Tang Yuguo¹ Bayanheshig¹ Li Wenhao¹ Tan Xin¹ Cui Jinjiang³

¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
³ Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China

Abstract The parameter errors of the flat-field holographic concave grating including radius error, recording geometry error and use geometry error are induced by the fabrication and usage. In order to give theoretical guidance to the design and assembly of the spectrometers, the geometric ray-tracing method is used to analyze the image widths and the meridian focal lines for different parameter errors. It is discovered that, for a great parameter error range, there are parallel displacement and tilt which affect the parameter errors. The numerical calculation results indicate that, in a large neighborhood around the design point, the parameter errors can be compensated by each other and the spectral resolution can be as good as designed after compensation of the errors.

Key words diffraction and gratings; holography; grating design; error compensation

OCIS codes 050.0050; 050.1950; 090.0090; 090.1000

1 引 言

平场全息凹面光栅的概念最早由 Hayat 等^[1]

提出,它利用电荷耦合器件(CCD)和微通道板等平面阵列探测器同时接收所有波长的光谱,从而实现

收稿日期: 2011-01-20; 收到修改稿日期: 2011-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(60478034)、“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAK03A02)和吉林省科技发展计划项目(20070523,20086013)资助课题。

作者简介: 孔 鹏(1981—),男,博士研究生,主要从事平场全息凹面光栅设计与制作工艺等方面的研究。

E-mail: kongdapeng@yahoo.com.cn

导师简介: 唐玉国(1967—),男,博士,研究员,主要从事光谱技术和光谱仪器等方面的研究。E-mail: tangyg@yiliaoyiqi.com

* 通信联系人。E-mail: bayin888@sina.com

快速多通道光谱分析。20 世纪 90 年代以来,随着 CCD 等平面阵列探测器应用技术的日益成熟以及应用领域的迅速拓展^[2~4],平场全息凹面光栅在光谱仪器领域的重要性日益提高,推动了平像场型光栅光谱仪的发展和普及,促进了人们对平场全息凹面光栅的研究^[5~7]。在研究方法上也不再局限于凹面光栅的几何像差理论,出现了利用光学设计软件如 Zemax^[8] 和 Code V^[9] 优化光栅结构参量的设计方法。目前平场光谱仪正向微型化方向发展,平场全息凹面光栅作为便携式微型光栅光谱仪的核心元件,其光谱成像质量直接决定光谱仪的性能指标^[10,11]。

通过优化设计得到的光栅结构参量具有很高的精度,实际制作过程中不可能将理论计算所得的最优化结构准确实现,必然存在结构参量误差,影响光栅的成像质量。全息凹面光栅是在涂有光刻胶的凹面基底上记录两束激光的干涉条纹,通过显影转化为浮雕轮廓制作而成^[12~14]。在凹面基底上涂覆光刻胶一般采用离心式旋涂的方式,涂胶后得到的胶层一般中心薄边缘厚^[15],造成凹面光栅曲率半径相比基底有所减小,加之基底加工、镀膜和复制等环节带来的误差,使得光栅的曲率半径偏离优化设计值。在制作光路与使用光路的装调中同样不可避免地存在调整误差,因此光栅的结构参量误差包括曲率半径误差、制作结构误差和使用结构误差。文献[16]分析了平场全息凹面光栅的制作结构误差和使用结构误差对光栅成像的影响,并指出使用结构误差与制作结构误差之间可以相互补偿,但只分析了两种情况,没有涉及曲率半径误差的分析与补偿问题。

本文对各种光栅结构参量误差对光栅成像质量的影响进行全面分析,找到每一种参量误差的作用规律;并从这些规律出发,揭示不同结构参量误差之间存在的补偿作用,从而为光栅的设计制作及光谱仪的装调提供借鉴。

2 平场全息凹面光栅的优化设计

平场凹面全息光栅制作结构与使用结构如图 1 所示。以光栅中心点 O 为原点建立直角坐标系,光栅法线方向为 x 轴的方向,垂直刻线方向为 y 轴的方向,沿刻线方向为 z 轴的方向。狭缝中心点 A 及其像点 B ,记录点 C, D 均位于子午面 xOy 内, $P(x, y, z)$ 为光栅上任一点。由 C, D 发出的记录光束的中心主光线 CO 和 DO 长度分别为 r_C 和 r_D ,与 x 轴夹角分别为 γ 和 δ 。由 A 发出波长为 λ 光束的中心主光线 AO 长

度为 r_A ,与 x 轴夹角为 α ,经光栅衍射后第 m 级衍射光成像在探测器 B_1B_2 上 B 点,像距为 OB 长度为 r_B ,衍射角为 β 。 OH 为从 O 点向光谱面 B_1B_2 所作的垂线,其长度为 r_H ,与 x 轴夹角为 β_H 。各角度的符号规则是,以 x 轴为基准,逆时针为正,顺时针为负。

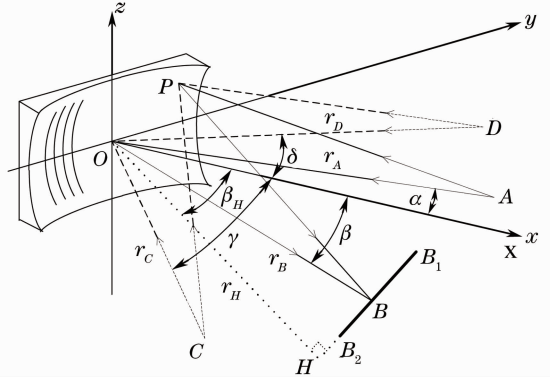


图 1 平场全息凹面光栅制作及使用结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the recording and using geometry of the flat-field holographic concave grating

光线 APB 的光程函数 F 的级数展开式为^[17]

$$F = F_{000} + yF_{100} + zF_{011} + (1/2y^2)F_{200} + (1/2z^2)F_{020} + (1/2y^3)F_{300} + (1/2yz^2)F_{120} + \dots, \quad (1)$$

式中从 F_{200} 开始后面的各项 F_{ijk} 代表各种像差,其中 F_{200} 代表离焦, F_{020} 代表像散, F_{300} 代表子午彗差, F_{120} 代表弧矢彗差。由光程函数 F 能够给出像面上子午和弧矢方向光线偏移量 δ_y 和 δ_z 的表达式^[18]:

$$\delta_y = \frac{r_B - y \sin \beta}{r_B \cos \beta} \left[(r_B - y \sin \beta) \frac{\partial F}{\partial y} - y \sin \beta \frac{\partial F}{\partial z} \right], \quad (2)$$

$$\delta_z = (r_B - y \sin \beta) \frac{\partial F}{\partial z}. \quad (3)$$

在平场全息凹面光栅的优化设计中,为了使整个使用波段都获得好的成像质量,定义一个优化函数:

$$W = \sum \omega_i \sum (\delta_y + f\delta_z)^2, \quad (4)$$

式中 $\sum (\delta_y + f\delta_z)^2$ 表示对通过光栅表面若干个点的衍射光线在像面上相对理想像点的偏移量进行加权平方再求和, ω_i 为不同波长的加权因子,平场全息光栅的优化设计目标就是找到使 W 最小化的使用结构和记录结构。

通过优化设计,各个波长的光谱像的光线汇聚点均优化到像面前后,光线汇聚点距离像面越近得到的光谱像尺寸就越小。对于光谱分析仪器,最重要的是子午方向的聚焦性能,即光谱像宽度的大小,它决定了光谱仪分辨率的高低,因此着重讨论子午

焦线随光栅参数误差的变化规律。

3 光栅结构参量误差对像宽的影响分析

3.1 设计实例

为了便于分析各个光栅参量误差对光栅光谱分辨率影响的规律,结合一个设计实例进行计算分析。设计一个用于小型光谱仪的平场全息凹面光栅,其使用波段为 200~1100 nm,光谱长度 $L=28.6$ mm,曲率半径 $R=100.668$ mm,光栅直径为 30 mm;制作结构为 $\gamma=11.937^\circ$, $\delta=18.229^\circ$, $r_C=113.446$ mm, $r_D=119.805$ mm,记录波长 $\lambda=441.6$ nm;使用结构为 $r_A=95.318$ mm, $\alpha=-5.283^\circ$, $r_H=102.504$ mm, $\beta_H=-11.688^\circ$,光谱级次 $m=+1$ 。

平场全息凹面光栅的各种像差中决定子午焦线位置的主要是离焦像差 F_{200} ,因此子午焦线位置可由 $F_{200}=0$ 求得。对同一个光谱仪来说像面上光谱像的宽度由子午焦线的位置决定,子午焦线距离像面越近像宽越小。通过分析各个波长处光谱像宽度的变化趋势就能够直观地了解子午焦线的位置。计算分析时所得到的光谱像宽度均为像斑在接收面上的全宽度,所追迹的光线均来自轴上点光源。在实际操作中将曲率半径误差、记录臂长误差和入臂出臂误差控制在 1 mm 以内是容易满足的,因此在进行误差分析时,长度的最大误差选为 ± 1 mm;记录角度的最大误差选为 ± 0.01 rad。

3.2 曲率半径误差对像宽的影响

曲率半径误差分别为 ± 1 mm 时的子午焦线位置如图 2 所示,当曲率半径增大时子午焦线向远离光栅的方向移动,曲率半径减小时子午焦线向靠近光栅的方向移动。在此过程中子午焦线的形状几乎没有变化,也就是说在相当大的误差范围内曲率半径的变化仅仅会使子午焦线的位置相对像面发生前后平移,而不会影响其弯曲程度。由于子午焦线为

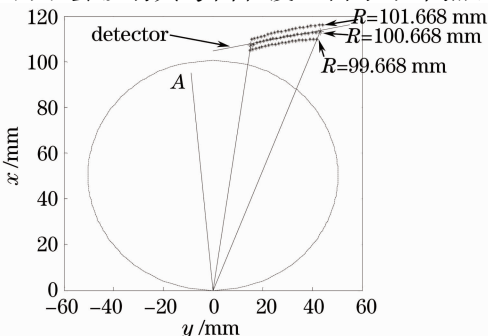


图 2 不同曲率半径时的子午焦线位置

Fig. 2 Meridian focal lines with different curvature radii

向上弯曲的曲线,所以当子午焦线向上平移时中间波长的子午光线的焦点距离像面较远,其像宽大于两端波长的像宽;同理,当子午焦线向下平移时中间波长的像宽小于两端波长的像宽,如图 3 所示。因此,只需根据像宽的变化曲线就能推测子午焦线随光栅参量误差的变化规律。

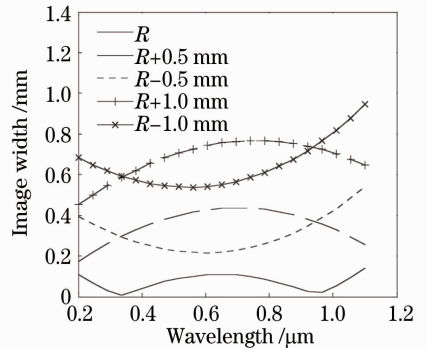


图 3 不同曲率半径下光谱像宽度随波长变化曲线

Fig. 3 Spectral image widths versus wavelength with different radii

3.3 制作结构误差对像宽的影响

记录臂长误差对像宽的影响如图 4 所示,当两记录臂长同时增大 1 mm 或同时减小 1 mm 时像宽的变化不明显;但当两记录臂长产生符号相反的误差时像宽的变化非常剧烈。同时可以看出,当记录臂长产生误差时,子午焦线相对于像面不仅仅发生平移,还会产生倾斜。

记录角度误差对像宽的影响与记录臂长误差相似,在使子午焦线产生平移的同时伴随着倾斜,如图 5 所示。如果能使记录臂长误差与记录角度误差引起的子午焦线倾斜相互抵消,便可以使最终制作结构误差造成的子午焦线偏移只剩下平移作用。图 5 为记录参量 ($r_C-0.86$, $r_D+0.86$, $\gamma-0.01$, $\delta+0.01$) 时的像宽曲线,说明记录臂长误差与记录角度误差

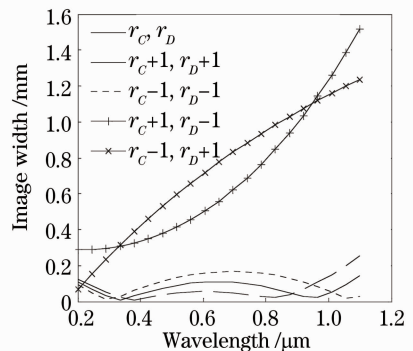


图 4 不同记录臂长下光谱像宽度随波长变化曲线

Fig. 4 Image widths versus wavelength with different recording distances

造成的子午焦线倾斜可以互相补偿,补偿后的子午焦线相对于像面位置只产生前后平移。

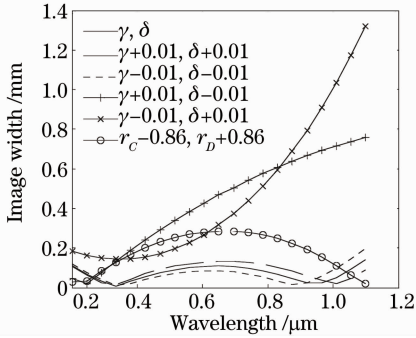


图 5 不同记录角度下光谱像宽度随波长变化曲线
Fig. 5 Spectral image widths versus wavelength with different recording angles

3.4 使用结构误差对像宽的影响

实际装调过程中接收面是根据整个波段的成像质量进行调整后确定最终位置的。只讨论入臂长度误差和入射角误差对像宽的影响,如图 6 所示,入臂误差和入射角误差对像宽的影响特点与曲率半径误差相似,同样是使子午焦线相对像面发生前后移动,而不产生倾斜作用。通过对入缝位置为($r_A+0.62, \alpha+0.01$)时的像宽曲线进行计算可知,入臂误差与入射角误差可以互相补偿,补偿后的光谱像质与理论设计值较为接近。

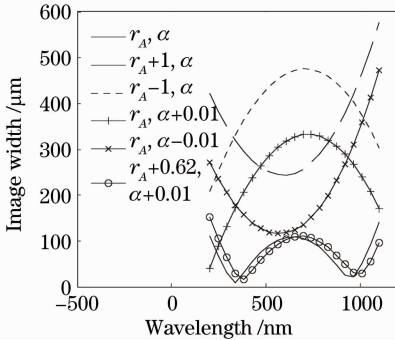


图 6 不同入缝位置下光谱像宽度随波长变化曲线
Fig. 6 Spectral image widths versus wavelength with different geometries

4 光栅结构参量误差之间的补偿作用

平场全息凹面光栅各项参量的误差均可以等效为子午焦线相对设计像面位置的平移,因此各种参量误差之间存在普遍的补偿作用。只有记录臂长误差与记录角度误差会造成子午焦线相对像面的倾斜,当两种倾斜得到互相补偿时制作结构误差能够与曲率半径误差或者使用结构误差进行补偿;当两种倾斜不能互相补偿时则只能通过调整像面位置和

角度进行补偿。几种误差补偿作用进行数值计算与分析。图 7 中曲线 *a* 为理论设计参量下的像宽曲线。曲线 *b* 显示了曲率半径误差与入臂误差之间的补偿作用,在($R+1, r_A+1.83$)的情况下曲线 *b* 几乎与曲线 *a* 重合,说明曲率半径误差与入臂误差在较大范围内具有相同的成像调整作用。曲线 *c* 与曲线 *d* 显示了曲率半径误差与入射角误差的补偿作用,通过对比 *a, c, d* 三条曲线可见,入射角误差只能在较小的范围内与曲率半径误差(或入臂误差)进行补偿,这主要是由于入射角的变化会导致整个成像位置的旋转,仅仅调整入臂或曲率半径无法进行补偿,需要结合像面角度的调整。对于曲线 *e* 与 *f*,记录臂长误差与记录角度误差导致的子午焦线倾斜已经互相抵消,通过调整入臂长度或曲率半径就可以使光栅的成像质量达到与设计结果较为相近的水平。当记录臂长误差与记录角度误差造成的子午焦线倾斜无法相互抵消时就只能通过调整像面位置进行补偿,如曲线 *g* 所示,改变像面的位置和方位角后获得的成像质量与设计结果非常接近。实际上,在本文讨论的误差范围内平场全息凹面光栅的各种参量误差的结果都是使子午焦线发生平移或倾斜,通过调整像面位置均能将光谱分辨率补偿至与设计结果相近的水平。

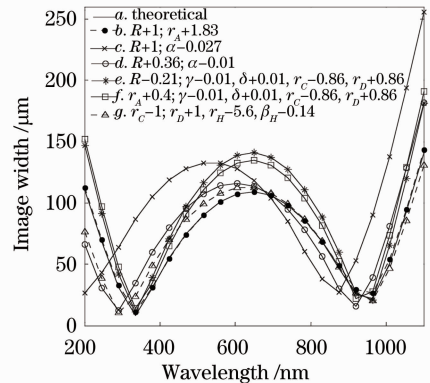


图 7 各种参量误差之间的补偿作用
Fig. 7 Compensation between the grating parameter errors

5 结 论

利用光线追迹方法求得像面上的像斑宽度随波长的变化曲线,阐述了像宽曲线与子午焦线的对应变化关系;通过分析各种参量误差对像宽曲线的影响发现:在容易保证的误差范围内,光栅参量误差对子午焦线的影响作用可以分为平移作用和倾斜作用。曲率半径误差与使用结构误差主要产生平移作

用;制作结构误差主要产生倾斜作用,另外还有少量平移作用。数值计算结果显示,光栅参量误差之间存在普遍的补偿作用;曲率半径误差可与使用结构误差进行补偿;制作结构误差的倾斜作用可由记录臂长与记录角度相互抵消,此时制作结构误差只存在平移作用,可与曲率半径误差或使用结构误差进行补偿;当制作结构误差存在倾斜作用时只能通过调整像面的位置和方位角进行补偿。在本文讨论的误差范围内,各种参量误差补偿之后均能够达到与设计结果相近的成像水平。

参 考 文 献

- 1 G. S. Hayat, J. Flamand, M. Lacroix *et al.*. Designing a new generation of analytical instruments around the new types of holographic diffraction grating [J]. *Opt. Engng.*, 1975, **14**(5): 420~425
- 2 Gong Zhihua, Chen Min, Wang Yong *et al.*. Measurement of monochromator's angle repeatability by phase plate diffraction collimation method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(10): 2813~2817
- 3 巩志华, 陈敏, 王勇等. 单色仪转角重复精度的相位板衍射准直方法测量[J]. *光学学报*, 2009, **29**(10): 2813~2817
- 4 Yang Yuezong, Cao Wenxi, Sun Zhaohua *et al.*. Development of real-time hyperspectral radiation sea-observation system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 102~107
- 5 杨跃忠, 曹文熙, 孙兆华等. 海洋高光谱辐射实时观测系统的研制[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 102~107
- 6 Yao Shunchun, Lu Jidong, Lu Zhimin *et al.*. Influence of sample morphology on laser ablation properties of coal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 1126~1130
- 7 姚顺春, 陆继东, 卢志民等. 样品形态对燃煤的激光烧蚀特性影响分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 1126~1130
- 8 E. Sokolova. Holographic diffraction gratings for flat-field spectrometers [J]. *J. Mod. Opt.*, 2000, **47**(13): 2377~2389
- 9 Zhou Qian, Li Lifeng. Design method of convex master gratings for replicating flat-field concave gratings [J]. *Spectrosc. & Spectral Anal.*, 2009, **29**(8): 2281~2285
- 10 周倩, 李立峰. 光谱仪用平场凹面光栅的凸面母光栅的消像差设计思路[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, **29**(8): 2281~2285
- 11 Pi Daorui, Huang Yuanshen, Zhang Dawei *et al.*. Optimization of the flat-field holographic concave grating in wide spectral range [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(2): 1009~1016
- 12 皮道锐, 黄元申, 张大伟等. 宽光谱平像场全息凹面光栅的优化研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(2): 1009~1016
- 13 Li Chaoming, Wu Jianhong, Tang Minxue. Design of flat field holographic concave grating [J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(2): 57~58
- 14 李朝明, 吴建宏, 唐敏学. 平场全息凹面光栅的设计[J]. *激光杂志*, 2005, **26**(2): 57~58
- 15 Xiang Xianyi, Wen Zhiyu. Design of flat field holographic concave grating for near-infrared spectrophotometer [J]. *Spectrosc. & Spectral Anal.*, 2008, **28**(7): 1670~1673
- 16 向贤毅, 温志渝. 用于近红外光谱仪的平场全息凹面光栅的模拟与设计[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, **28**(7): 1670~1673
- 17 Jia Hui, Yao Yong. Characteristics of typical optical systems with diffractive gratings of micro-spectrometers and improvement of spectrometer's resolution [J]. *Spectrosc. & Spectral Anal.*, 2007, **27**(8): 1653~1656
- 18 贾辉, 姚勇. 微小型光栅光谱仪光学系统的特点与光谱分辨率的提高[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, **27**(8): 1653~1656
- 19 Cheng Liang, Chen Yanping, Zhu Ruobo *et al.*. Optimum design of flat-field holographic concave grating for micro-spectrometers [J]. *J. Zhejiang University (Engineering Science)*, 2008, **42**(2): 312~316
- 20 程梁, 陈燕平, 朱若波等. 微型光谱仪平场全息凹面光栅的优化设计[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2008, **42**(2): 312~316
- 21 Zhao Jinsong, Li Lifeng, Wu Zhenhua. In-situ self-monitoring of latent image in fabrication of holographic gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 851~858
- 22 赵劲松, 李立峰, 吴振华. 全息光栅制作中的实时潜像自监测技术[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 851~858
- 23 Zhao Jinsong, Li Lifeng, Wu Zhenhua. Modeling of in-situ monitoring curves during development of holographic gratings [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1146~1150
- 24 赵劲松, 李立峰, 吴振华. 全息光栅实时显影监测曲线的理论模拟[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1146~1150
- 25 Kong Peng, Bayanheshig, Li Wenhao *et al.*. Modeling and in-situ monitoring of the asymmetric exposure and development of holographic grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 65~69
- 26 孔鹏, 巴音贺希格, 李文昊等. 全息光栅非对称曝光显影的理论模拟及实时监测[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 65~69
- 27 Bayanheshig, Zhang Haotai, Li Wenhao. Mathematic model and experiment verification of spin-coating on concave spherical substrate [J]. *Opt. & Precision Engng.*, 2008, **16**(2): 229~234
- 28 巴音贺希格, 张浩泰, 李文昊. 凹球面基底离心式涂胶的数学模型及实验验证[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(2): 229~234
- 29 Zhou Qian, Zeng Lijiang, Li Lifeng. Numerical simulation and experimental demonstration of error compensation between recording structure and use structure of flat-field holographic concave gratings [J]. *Spectrosc. & Spectral Anal.*, 2008, **28**(7): 1674~1678
- 30 周倩, 曾理江, 李立峰. 平场全息凹面光栅制作结构与使用结构之间误差补偿作用的数值模拟与实验验证[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, **28**(7): 1674~1678
- 31 H. Noda, T. Namioka, M. Seya. Geometric theory of the grating [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, **64**(8): 1031~1036
- 32 M. Chrisp. Aberrations of holographic toroidal grating systems [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(10): 1508~1518