

## 球差在平场全息凹面光栅设计中的作用

孔 鹏<sup>1</sup> 巴音贺希格<sup>1\*</sup> 齐向东<sup>1</sup> 李文昊<sup>1</sup> 崔锦江<sup>2</sup><sup>(1</sup> 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)  
<sup>2</sup> 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** 基于平场全息凹面光栅几何像差理论,分析了初级像差与高阶像差特别是球差对平场全息凹面光栅成像的作用。通过一个具体的设计,分别讨论宽波段光栅和窄波段光栅设计中校正球差与否对设计结果的影响。通过对光谱像大小和各种像差系数大小进行对比分析得出以下结论:宽波段平场全息凹面光栅像差较大,决定光谱像大小的主要是初级像差,球差的影响难以显现,在进行光栅设计时可以不考虑球差;窄波段光栅的离焦像差较小,球差的影响开始变得显著,此时在设计过程中考虑球差的校正能够进一步改善光栅的成像质量。

**关键词** 光栅;光谱仪;平场;全息凹面光栅;几何像差;点列图

**中图分类号** O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.010501

## Effect of Spherical Aberration on Design of Flat-Field Holographic Concave Grating

Kong Peng<sup>1</sup> Bayanheshig<sup>1</sup> Qi Xiangdong<sup>1</sup> Li Wenhao<sup>1</sup> Cui Jinjiang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China

**Abstract** The effect of primary aberration and high-order aberration, especially spherical aberration, on imaging of flat-field holographic concave gratings is analyzed by using geometrical aberration theory. The difference between design results when spherical aberration is corrected or not is discussed through a specific design case, for situation of wide wave-range and narrow wave-range, respectively. Analysis is made through comparison of the spectral image size and the geometrical aberration coefficients. It is discovered that, for wide wave-range grating, the image size is determined mainly by primary aberration. Spherical aberration can be ignored during grating design procedure because the effect of spherical aberration is much less than that of primary aberration. But in the case of narrow wave-range grating, the effect of spherical aberration becomes significant because the defocus aberration is very small. The spherical aberration must be corrected in the design procedure when a much better imaging quality is expected.

**Key words** gratings; spectrometer; flat field; holographic concave grating; geometrical aberration; spot diagram

**OCIS codes** 050.1950; 080.1010; 090.1970; 090.2890; 300.6190

## 1 引言

随着 CCD 等平面阵列光电探测器技术的发展和成熟,平像场型微型光栅光谱仪获得了迅速的发展和广泛的应用<sup>[1~5]</sup>。应用平面光栅的微型平场光谱仪能够达到较好的像差特性<sup>[6,7]</sup>,但过多的光学作用面限制

**收稿日期**: 2012-08-20; **收到修改稿日期**: 2012-09-23; **网络出版日期**: 2012-11-12

**基金项目**: 国家自然科学基金(60478034)、国家重大科学仪器设备开发专项(2011YQ120023)、国家创新方法工作专项(2008IM040700)、中国科学院知识创新项目(100132H100)和江苏省自然科学基金(BK2012188)资助课题。

**作者简介**: 孔 鹏(1981—),男,博士,助理研究员,主要从事全息光栅设计与制作技术等方面的研究。

E-mail: kongdapeng@yahoo.com.cn

\* 通信联系人。E-mail: bayin888@sina.com

了其应用领域。利用平场全息凹面光栅能构成只有一个光学作用面的光谱仪器,是微型光谱仪的一个主要发展方向<sup>[8,9]</sup>。

根据平场全息凹面光栅几何像差理论,像差大小取决于光栅的使用结构和制作结构<sup>[10~12]</sup>。光栅的设计就是求得使用结构参量和制作结构参量的最优值,从而使光栅像差得到最大限度的校正。在众多的设计方法之中,有的是通过优化光栅像差系数进行求解<sup>[13]</sup>,有的通过优化像面上光谱点列图大小进行求解<sup>[14~16]</sup>,还有的直接利用光学设计软件提供的自动优化功能进行求解<sup>[17,18]</sup>。无论采用什么设计方法,最终目的都是获取最佳的光谱分辨率和光能利用率<sup>[19]</sup>。研究平场全息凹面光栅几何像差理论能够深入理解光栅成像特性,为光栅优化设计提供理论指导。所有的设计方法都必须以几何像差理论为基础,才能避免优化算法导致的失去物理意义的解。目前,多数文献都将主要精力放在设计方法的探索和优化算法的改进,少有文献对光栅几何像差在平场全息凹面光栅设计中的作用进行探讨。

本文以几何像差理论为基础,分析对比初级像差与高阶像差对平场全息凹面光栅成像的作用,重点讨论高阶像差主要是球差对光栅成像的影响。通过一个具体的设计,分别讨论宽波段光栅和窄波段光栅设计中校正球差与否对设计结果的影响,进而得出具有一定指导性的结论,为平场全息凹面光栅的设计提供理论依据。

## 2 全息凹面光栅的几何像差

如图1所示,以光栅表面几何中心点 $O$ 为原点、过 $O$ 点之光栅表面法线为 $x$ 轴、垂直于 $O$ 点处光栅条纹方向为 $y$ 轴、平行于 $O$ 点处光栅条纹方向为 $z$ 轴建立直角坐标系,坐标系符合右手螺旋法则,则 $xOy$ 平面即是光栅的子午面(色散平面)。图1中给出了平场全息凹面光栅的记录及使用光路结构,光栅条纹由两点光源 $C$ 、 $D$ 所发出的激光束形成干涉条纹记录于光栅基底上而得, $C$ 、 $D$ 均在子午面内。光栅记录参数共有4个,即两点光源中心主光线 $CO$ 、 $DO$ 的长度 $r_C$ 、 $r_D$ 及其分别与 $x$ 轴所成夹角 $\gamma$ 、 $\delta$ 。由入缝中心点 $A$ 发出的光束经光栅衍射后,波长为 $\lambda$ 的第 $m$ 级衍射光成像在探测器 $B_1B_2$ 上 $B$ 点,入臂 $AO$ 长度为 $r_A$ ,出臂 $OB$ 长度为 $r_B$ ,入射角与衍射角分别为入臂和出臂与 $x$ 轴之间的夹角 $\alpha$ 、 $\beta$ 。探测器位置由两个参数 $r_H$ 、 $\beta_H$ 确定,其中 $r_H$ 为由 $O$ 点向像面所作垂线的长度, $\beta_H$ 为此垂线与 $x$ 轴之间的夹角。所涉及各角度遵守以下符号规则:以 $x$ 轴为基准,逆时针旋转所得角度符号为正,顺时针旋转所得角度符号为负。

令光栅上第 $0$ 条刻线位于坐标原点处,考虑一条光线 $APB$ ,点 $P(x, y, z)$ 为光栅表面第 $n$ 条刻线上任意一点,则其光程函数为<sup>[10]</sup>

$$F = \langle AP \rangle + \langle PB \rangle + nm\lambda, \quad (1)$$

式中 $\langle AP \rangle$ 、 $\langle PB \rangle$ 分别为 $A$ 、 $B$ 点与 $P$ 点之间的距离。对(1)式应用幂级数展开:

$$F = F_{00} + yF_{10} + \frac{1}{2}y^2F_{20} + \frac{1}{2}z^2F_{02} + \frac{1}{2}y^3F_{30} + \frac{1}{2}yz^2F_{12} + \frac{1}{8}y^4F_{40} + \frac{1}{4}y^2z^2F_{22} + \frac{1}{8}z^4F_{04} + \dots, \quad (2)$$

式中从 $F_{20}$ 开始后面所有 $F_{ij}$ 为像差系数,其中 $F_{20}$ 为离焦系数, $F_{02}$ 为像散系数, $F_{30}$ 为子午彗差系数, $F_{12}$ 为弧矢彗差系数, $F_{40}$ 、 $F_{22}$ 、 $F_{04}$ 等3项为球差系数,省略号代表更高阶的像差,在平场全息凹面光栅的设计中可以不予考虑。离焦和像散称为光栅的初级像差,其余各像差统称为光栅的高阶像差。各个像差系数的具体表达式在文献[10]中已列出,本文不再赘述。

像差越大则光栅成像质量越差,初级像差对像质影响最大,越高阶的像差对光栅成像的影响越小。通常设计平场全息凹面光栅时考虑较多的是前四项像差即离焦、像散、彗差的校正,这对一般的宽波段中低分辨光栅已经足够。但是,对波段较窄的情况,考虑球差的作用是有必要的。本文以一具体设计分析球差在平场全息凹面光栅设计中的影响。

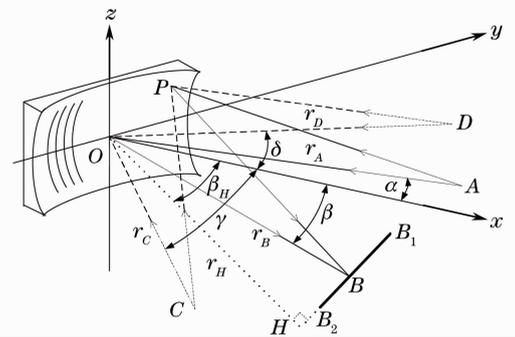


图1 平场全息凹面光栅记录及使用光路结构  
Fig. 1 Recording and use geometry of the flat-field holographic concave grating

### 3 球差在光栅设计中的影响

#### 3.1 宽波段光栅

光程函数不仅能够给出光栅的几何像差系数,而且能够导出光线在像面上相对理想成像位置的偏离量。建立优化函数  $W$ ,

$$W = \sum \omega_i \sum (\delta y + f\delta z)^2, \quad (3)$$

式中  $\delta y$ 、 $\delta z$  分别为水平方向和垂直方向的光线偏移量,其表达式为<sup>[20]</sup>

$$\delta y = \frac{r_B - y \sin \beta}{r_B \cos \beta} \beta \left[ (r_B - y \sin \beta) \frac{\partial F}{\partial y} - y \sin \beta \frac{\partial F}{\partial z} \right], \quad (4)$$

$$\delta z = (r_B - y \sin \beta) \frac{\partial F}{\partial z}, \quad (5)$$

$\sum (\delta y + f\delta z)^2$  为将对应于光栅表面若干点的光线偏移量  $\delta y$ 、 $\delta z$  进行加权求和。 $f$  为权重因子,因为水平方向光线偏移量对光栅成像的影响更为重要,决定光谱分辨率,所以  $f$  取值一般小于 1(本文取 0.1)。 $\omega_i$  为不同波长的加权因子。令优化函数  $W$  最小化即可求得最佳使用结构和记录结构。

在(4)式和(5)式中,光程函数  $F$  截取方式不同即表示优化过程中校正的像差不同。若光程函数取至(2)式中  $F_{12}$  项,则表示只校正离焦、像散与彗差;若光程函数取至  $F_{04}$  项,则表示校正包括球差在内的所有像差。以一个平场全息凹面光栅设计为例,分析球差(Spherical Aberration, SA)对设计结果的影响。由于设计中着重考虑的是光谱像宽度的压缩,本文主要分析光栅子午像差的影响,弧矢像差只作辅助分析。表 1 所示为平场全息凹面光栅设计要求。

按照上述优化方法求得光栅结构参数如表 2 所示,校正球差与未校正球差的优化结果均列于其中。

表 1 平场全息凹面光栅设计要求

Table 1 Design specifications for the flat-field holographic concave grating

Parameter	Value
Wavelength range / nm	350~850
Curvature radius / mm	96
Diffraction order	+1
Spectral length / mm	25
Recording wavelength / mm	441.6
Grating diameter / mm	30

表 2 宽波段光栅优化结构参数

Table 2 Optimization grating parameters of the wide-wave-range grating

Grating parameter	SA corrected	SA not corrected
$r_A$ / mm	88.496	88.537
$\alpha$ / (°)	-4.770	-4.485
$r_H$ / mm	93.505	90.526
$\beta_H$ / (°)	-23.395	-26.759
$\gamma$ / (°)	12.418	11.624
$\delta$ / (°)	20.568	19.403
$r_C$ / mm	123.169	122.296
$r_B$ / mm	140.638	140.045

根据表 2 所列优化结果,利用几何光线追迹方法计算点光源经光栅衍射成像后光谱像斑的几何宽度与高度。图 2 为宽波段光栅光谱像的宽度和高度曲线,图中给出了校正球差与不校正球差两种情况的结果对比。从图中看出,两者结果相近。平场全息凹面光栅使用波段越宽,聚焦缺陷越大。此时决定光谱像大小的主要是离焦,因为不能在所有波长处消除离焦,所以光谱像宽度曲线呈现出波浪形变化趋势,即光谱像宽度在某些波段较小,而在另外一些波段较大。

为了进一步验证光栅的像差校正效果,计算出光栅各种像差系数的数值,列于表 3 之中,其中 a 为校正球差时所得结果,b 为不校正球差时所得结果。需要注意的是,代表像差大小的是像差系数值的绝对值,而非其符号的正负。对照表 3 与图 2 可以看出,两种光栅的光谱像

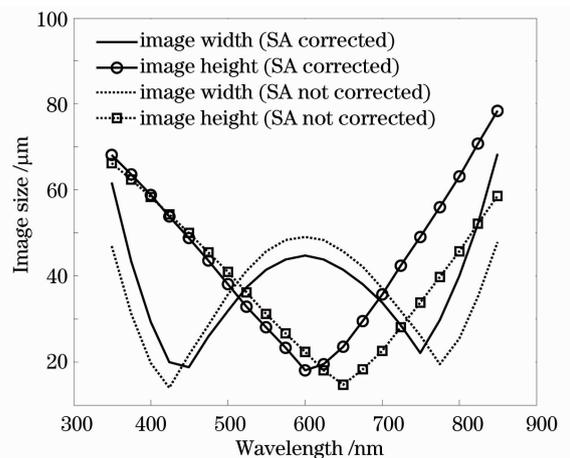


图 2 宽波段光栅光谱像尺寸

Fig. 2 Spectral image size of the wide wave-range grating

宽度大小关系与离焦像差系数绝对值大小关系是一致的,即离焦像差系数绝对值大则光谱像宽度也大,离焦像差系数绝对值小则光谱像宽度也小。光谱像高度大小关系与像散系数绝对值大小关系是一致的,即像散系数绝对值大则光谱像高度也大,像散系数绝对值小则光谱像高度也小。其余各种像差系数之大小与图2中光谱像大小无直接对应关系,且校正球差与否差别不大。由此可见,当光谱范围较宽时,决定光谱像宽度与高度的主要像差分别是离焦与像散,进行光栅参数优化时光程函数只需截取至第四个像差项,校正球差与否对光栅设计结果影响不大。

表3 宽波段光栅像差系数

Table 3 Aberration coefficients of the wide wave-range grating

$\lambda / \text{nm}$	Grating	$F_{20}/10^{-5}$	$F_{02}/10^{-5}$	$F_{30}/10^{-7}$	$F_{12}/10^{-7}$	$F_{40}/10^{-8}$	$F_{22}/10^{-9}$	$F_{04}/10^{-8}$
350	a	-1.898	-1.643	-0.918	-8.394	2.533	-1.692	-1.648
	b	-1.466	-1.638	-0.734	-7.178	2.235	-1.531	-1.539
475	a	0.054	0.875	1.371	-6.973	3.383	2.409	-1.485
	b	0.296	-0.988	1.348	-5.853	2.998	2.285	-1.380
600	a	0.534	-0.011	2.222	-6.033	3.786	5.230	-1.322
	b	0.734	-0.257	2.083	-5.066	3.348	4.760	-1.230
725	a	-0.125	0.954	1.868	-5.420	3.778	7.033	-1.153
	b	0.157	0.559	1.705	-4.651	3.323	6.165	-1.080
850	a	-1.556	2.023	0.626	-4.964	3.433	8.181	-0.969
	b	-1.101	1.461	0.522	-4.431	2.997	6.865	-0.921

### 3.2 窄波段光栅

当光谱范围较小时,平场全息凹面光栅的聚焦曲线能够更加贴近像面位置,此时光栅像差相对宽波段光栅会小很多。由于初级像差大大减小,高阶像差的影响开始显现。仍然以表1所给条件为例,在表1所要求的光栅光谱范围中截取一段,假设一窄波段光栅的光谱范围为652~704 nm,在与表1所要求光栅具有相同色散率的前提下,此时的光谱长度应为2.5 mm,其它设计要求与表1一致。表4为设计结果。

根据表4所列优化结果,利用几何光线追迹方法计算点光源经光栅衍射成像后光谱像斑的几何宽度与高度,图3为窄波段光栅光谱像的宽度和高度曲线,图中给出了校正球差与不校正球差两种情况的结果对比。从图中看出,光谱像宽度曲线较为平直,说明光栅子午聚焦曲线相比宽波段光栅更加贴近像平面。此时离焦系数较小,高阶像差的影响开始凸显。

表4 窄波段光栅优化结构参数

Table 4 Optimization grating parameters of the narrow wave-range grating

Grating parameter	SA corrected	SA not corrected
$r_A / \text{mm}$	87.612	86.251
$\alpha / (^\circ)$	-2.282	-1.086
$r_H / \text{mm}$	102.759	104.500
$\beta_H / (^\circ)$	-17.400	-19.075
$\gamma / (^\circ)$	5.602	3.583
$\delta / (^\circ)$	13.885	11.691
$r_C / \text{mm}$	115.907	115.173
$r_B / \text{mm}$	127.785	126.436

计算出光栅各种像差系数的数值,列于表5之中,其中a为校正球差时所得结果,b为不校正球差时所得结果。从计算结果可以得出以下结论:1)对比表5与表3,窄波段光栅离焦像差系数绝对值减小1个数量级以上,说明在光谱范围较小的情况下可以大幅度提高光栅成像质量,这一点从图3与图2中光谱像宽度曲线地

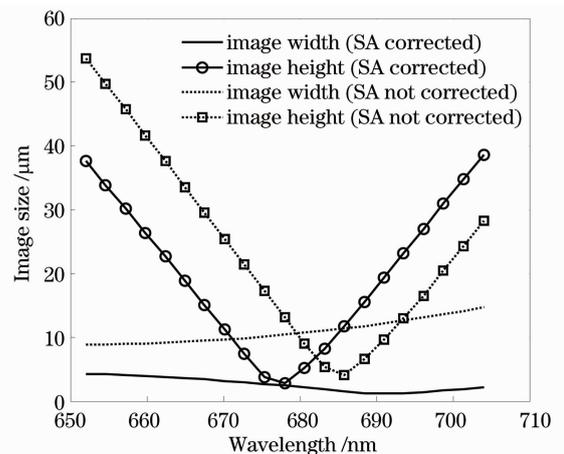


图3 窄波段光栅光谱像尺寸

Fig. 3 Image size of the narrow wave-range grating

可直观地看出。2)表5中光栅a与光栅b离焦像差系数绝对值的大小关系与图3中光谱像宽曲线之对比无直接对应关系,说明在光谱范围较小的情况下决定光谱像宽度的主要因素不再仅仅是离焦,球差的作用开始变得显著。表5中,光栅a的 $F_{40}$ 项比光栅b小一个数量级, $F_{22}$ 项小一半。图3中,光栅a的光谱像宽度远小于光栅b。由此可知,校正球差可以进一步提高窄波段平场光栅的分辨率。(3)光谱像高度大小关系与像散系数绝对值大小关系是一致的,即象散系数绝对值大则光谱像高度也大,象散系数绝对值小则光谱像高度也小,说明决定光谱像高度的主要因素仍是像散。

表5 窄波段光栅像差系数

Table 5 Aberration coefficients of the narrow wave-range grating

$\lambda / \text{nm}$	Grating	$F_{20}/10^{-5}$	$F_{02}/10^{-5}$	$F_{30}/10^{-7}$	$F_{12}/10^{-7}$	$F_{40}/10^{-8}$	$F_{22}/10^{-9}$	$F_{04}/10^{-8}$
350	a	0.097	-0.844	0.445	-0.440	-0.266	-10.468	-1.802
	b	0.048	-1.136	0.350	0.495	-2.145	-24.069	-2.753
475	a	0.095	-0.329	0.264	-0.364	-0.276	-9.929	-1.728
	b	0.038	-0.593	0.129	0.506	-2.159	-23.589	-2.677
600	a	0.077	-0.047	0.070	-0.290	-0.290	-9.397	-1.653
	b	0.012	0.188	-0.105	0.515	-2.178	-23.117	-2.599
725	a	0.043	0.708	-0.137	-0.217	-0.309	-8.873	-1.579
	b	-0.030	0.501	-0.350	0.522	-2.201	-22.653	-2.522
850	a	-0.006	1.230	-0.357	-0.146	-0.332	-8.357	-1.504
	b	-0.087	1.052	-0.607	0.528	-2.227	-22.196	-2.444

## 4 结 论

分析了球差在宽波段与窄波段平场全息凹面光栅设计中的作用。通过对光谱像大小和各种像差系数大小进行对比分析,得出以下结论:1)宽波段平场全息凹面光栅像差较大,决定光谱像大小的主要是初级像差,球差的影响难以显现,在进行光栅设计时可以不考虑球差。2)当光栅光谱范围变小时,离焦像差大大降低,球差的影响开始变得显著,此时在设计过程中考虑球差的校正能够进一步改善光栅的成像质量。

## 参 考 文 献

- Chen Yue-Rui, Sun Bin, Han Tao *et al.*. Densely folded spectral images of the CCD spectrometer working in the full 200~1000 nm wavelength range with high resolution [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(25): 10049~10054
- Ma Qingjun, Song Kefei, Qu Yi *et al.*. Design of CCD circuit systems for ultraviolet limb imaging spectrometers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(7): 1538~1545  
马庆军, 宋克非, 曲艺等. 紫外临边成像光谱仪 CCD 电路系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(7): 1538~1545
- Chang Lingying, Zhao Baochang, Yang Jianfeng *et al.*. Optical system design of a two-linear array stereoscopic mapping CCD camera [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(8): 0816001  
常凌颖, 赵葆常, 杨建峰等. 两线阵立体测绘 CCD 相机光学系统设计[J]. *中国激光*, 2011, **38**(8): 0816001
- Liu Dongmei, Xia Rihui, Pan Yonggang *et al.*. Study of digital spectrometer based on charge coupled device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0107003  
刘冬梅, 夏日辉, 潘永刚等. 基于电荷耦合器件的数字光谱分析仪的研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(1): 0107003
- Liu Yujuan, Cui Jicheng, Bayanheshig *et al.*. Design and application of imaging spectrometer with convex grating [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(1): 52~57  
刘玉娟, 崔继承, 巴音贺希格等. 凸面光栅成像光谱仪的研制与应用[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(1): 52~57
- Chen Fang, Xu Pengmei. Optical structure optimization of broadband astigmatism-free Czerny-Turner spectrometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(6): 1265~1271  
陈芳, 徐彭梅. 满足消像散条件的 Czerny-Turner 光谱仪光路的防干涉设计[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(6): 1265~1271
- Xue Qingsheng, Chen Wei. Design of modified Czerny-Turner spectral imaging system with wide spectral region [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(2): 233~240  
薛庆生, 陈伟. 改进的宽波段车尔尼-特纳光谱成像系统设计[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(2): 233~240

- 8 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. Eng.*, 1975, **14**(5): 420~425
- 9 J. M. Lerner, R. J. Chambers, G. Passereau. Flat-field imaging spectroscopy using aberration corrected holographic gratings [C]. *SPIE*, 1981, **268**: 122~128
- 10 H. Noda, T. Namioka, M. Seya. Geometric theory of the grating [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, **64**(8): 1031~1036
- 11 T. Namioka, M. Koike, D. Content. Geometric theory of the ellipsoidal grating [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(31): 7261~7274
- 12 S. Masui, T. Namioka. Geometric aberration theory of double-element optical systems [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1999, **16**(9): 2253~2268
- 13 N. K. Pavlycheva. Design of flat-field spectrograph employing a holographic grating [J]. *Sov. J. Opt. Technol.*, 1979, **46**(7): 394~396
- 14 W. R. McKinney, C. Palmer. Numerical design method for aberration-reduced concave grating spectrometers [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(15): 3108~3118
- 15 Zhou Qian, Li Lifeng. Design method of convex master gratings for replicating flat-field concave gratings [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(8): 2281~2285  
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
- 16 Kong Peng, Bayanheshig, Li Wenhao *et al.*. Optimization of double-grating flat-field holographic concave grating spectrograph [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0205001  
孔鹏, 巴音贺希格, 李文昊等. 双光栅平场全息凹面光栅光谱仪的优化设计 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(2): 0205001
- 17 Li Chaoming, Wu Jianhong, Zhao Yanjiao *et al.*. Development of flat field holographic concave gratings with high-resolution [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(7): 828~831  
李朝明, 吴建宏, 赵艳皎等. 高分辨率平场全息凹面光栅的研制 [J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(7): 828~831
- 18 Xiang Xianyi, Wen Zhiyu. Design of flat field holographic concave grating for near-infrared spectrophotometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(7): 1670~1673  
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
- 19 Kong Peng, Tang Yuguo, Bayanheshig *et al.*. Optimization of broad-band flat-field holographic concave grating without astigmatism [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(2): 565~569  
孔鹏, 唐玉国, 巴音贺希格等. 零像散宽波段平场全息凹面光栅的优化设计 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(2): 565~569
- 20 M. Chrisp. Aberrations of holographic toroidal grating systems [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(10): 1508~1518