

文章编号: 1001-3806(2015)01-0033-06

消像差 Offner 成像光谱仪的研究进展

韩 珊, 黄元申*, 李柏承, 张大伟, 倪争技

(上海理工大学 上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093)

摘要: 为了获得消像差 Offner 成像光谱仪, 以三镜系统为基础综述了 Offner 成像光谱仪的各种消像差方法, 介绍了由两块不同曲率半径凹面镜与凸面光栅构成的 Offner 成像光谱仪和狭缝与刻槽成不同方向的 Offner 成像光谱仪的消像差方法, 并得到面内结构及正交结构两种成像光谱仪结构, 其中正交结构在消像差方面更具优势, 为获得高质量 Offner 成像光谱仪提供了理论基础。

关键词: 光学设计; 消像差结构; 像差理论; Offner 成像光谱仪; 凸面光栅

中图分类号: TH744.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.01.007

Progress of Offner imaging spectrometers for eliminating aberration

HAN Shan, HUANG Yuanshen, LI Baicheng, ZHANG Dawei, NI Zhengji

(Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Research background and optical structure of an Offner imaging spectrometer were introduced. Aberration of the Offner imaging spectrometer was analyzed by analytical point row graph theory, single grating aberration theory and light path function analysis method respectively. Two special structures (surface inner structure and orthogonal structure) were put forward, which can allow imaging spectrometer with better image quality. It is the research trend to improve the image quality of an imaging spectrometer in the future.

Key words: optical design; eliminating aberration structure; aberration theory; Offner imaging spectrometer; convex grating

引 言

成像光谱仪是 20 世纪 80 年代以来以光谱遥感成像技术为基础发展起来的一种能同时获取物体空间和光谱信息的光学遥感仪器, 具有图谱合一性。广泛应用在卫星遥感技术、林业、农业、地质、医药、军事、海洋、地质勘探、生产制造、色度学、生态学等相关领域^[1-7]。而在各类型成像光谱仪中, Offner 成像光谱仪因其完美的光学特性, 受到了更为广泛的

关注。

Offner 成像光谱仪是建立在全反射式 Offner 两镜同心成像系统之上的, 将该系统中的凸球面镜换成凸球面光栅, 就得到 Offner 成像光谱仪结构^[8]。应用 Offner 成像系统的成像光谱仪与原有的采用平面光栅或凹面光栅结构的成像光谱仪相比, 具有明显的优点^[9]。这些优点包括以下几方面: (1) 具有完善成像能力, 例如, 一个微型 Offner 结构的设计方案可以使畸变小于一个像素的 0.1%, 而在原有的成像光谱仪中, 如采用凹面光栅的 Dyson 结构成像光谱仪, 在相同情况下能够取得的最小畸变至少是它的几十倍; (2) 它的光谱性能大大超过其它类型的光谱仪, 具有高的光谱和空间分辨率; (3) 因为它应用的是球面反射光学元件, 并采用同心结构, 使得对其设计更为简单, 使它很容易做成小型化和轻型化的仪器, 适合空间技术的发展需要。

为获得高成像质量 Offner 成像光谱仪, 2006 年, PRIETO-BLANCO^[10] 等人提出了一种基于子午

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61205156; 11105149); 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(2011YQ15004002; 2011YQ15004004); 上海市教委曙光资助项目(11SG44); 上海市科技委科研计划资助项目(11DZ2290301); 上海市研究生创新基金资助项目(JWCX-SL1302)

作者简介: 韩 珊(1989-), 女, 硕士研究生, 主要从事凸面衍射光栅的研究。

* 通讯联系人。E-mail: hyshyq@sina.com

收稿日期: 2013-12-04; 收到修改稿日期: 2013-12-16

和弧矢聚焦曲线的简单设计方法,该方法在三元件同心和罗兰圆配置的条件下,将子午和弧矢聚焦曲线在某一中心波长下相切,使设计方法简单、迅速。随后,2007年 LUCKE^[11]提出了一种平面外色散的 Offner 光谱仪。对于一个短狭缝系统可以使色散在所谓最佳成像面(best imaging circle, BIC)附近得到好像质的光谱像。PRIETO-BLANCO^[12]对这种系统进行了深入研究。在一个正交结构中,即入缝和出缝在两个互相垂直的平面内,可以实现消像散结果,获得较好的成像质量。由此看出,对于消像差 Offner 系统的设计具有非常重要的研究意义。

1 Offner 成像光谱仪光学结构

THEVENON 首先提出 Offner 两镜同心成像系统,随后 FISHER, CHRISP 和 MOUROULIS 等人又分别对此型分光系统进行了不同的设计^[13-15],使其在相关领域得到了发展。1987年 KWO^[16]等人提出了基于 Offner 成像系统的光栅成像光谱仪,这种设计在消除第 3 级像差方面取得了理想的效果,但要消除第 5 级像散则需要通过使用像差矫正光栅或者将光栅略微倾斜的方法,这就会使系统失去原有的对称性,带来彗差。

1999年 CHRISP 等人针对此缺点进行了改进,将大凹球面镜分成两个小凹球面镜,重新获得同心结构并采用罗兰圆配置,使得光谱成像系统更具小型化和轻量化。图 1 为 Offner 成像光谱仪结构示意图,包括一个点光源 S,两个球面反射镜 M₁ 和 M₂,一个凸面光栅 G,一个像点 I。其中 M₁, M₂ 和 G 拥有同一个球心 C,即为三同心光学系统。M₁, M₂, G 在顶点处的法线与 S 点共平面,光栅 G 的刻线方向垂直于该平面。为方便描述,在示意图中只画出了入射主光线(波长为 λ)SO₁ 经 M₁ 反射到达 O 点,

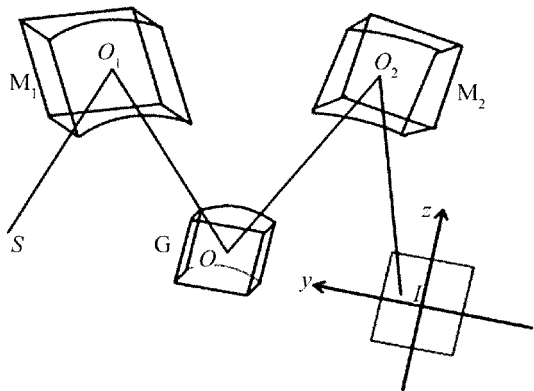


图 1 Offner 成像光谱仪结构

主光线 O₁O 经 G 衍射后的 M₂ 级光到达 O₂ 点,衍射主光线 OO₂ 经 m₂ 的反射光线最后到达像平面上的 I 点。距离 SO₁, O₁O, OO₂, O₂I 以及主光线 SO₁, O₁O, OO₂ 的入射角、光栅 G 的衍射角,称为 Offner 成像光谱仪的结构参量。

2 Offner 成像光谱仪的像差理论

现有的对 Offner 成像光谱仪进行成像质量分析的方法主要有解析点列图理论、单光栅像差理论及应用光程函数的计算方法。1983年 CHRISP^[17]提出的波像差理论是第 1 个针对多元件光学系统的像差理论,后经 LÜ^[18]发展使之适应平面对称的多元件光学系统。GOTO^[19]等人把这种分析方法引入光栅光学系统。以此为基础, NAMIOKA^[20-21]等人建立了解析点列图理论。2006年, PRIETO-BLANCO^[10]应用单光栅理论对 Offner 成像光谱仪的像差理论进行了分析,随后又采用类似凹面光栅几何理论^[22]的方法,即通过建立任意光线的光程函数,进行幂级数展开,求解子午和弧矢聚集曲线方程的方法,得到了 Offner 成像光谱仪的像差理论的又一种解析方式。

2.1 应用解析点列图理论

应用解析点列图理论进行系统像差分析^[23]首先要利用光线追迹方法得到系统的数值模型,然后运用级数展开方法,建立起系统的 3 阶解析模型,该模型给出了系统像差系数并可用于计算系统点列图的解析表达式。

对给定的 Offner 成像光谱仪结构,进行光线追迹,并对其建立解析模型,得到像平面上点 I(0, Y, Z) 的解析表达式^[23]如下式所示:

$$\begin{cases} Y = E_{100}w_1 + E_{200}w_1^2 + E_{020}l_1^2 + E_{011}l_1z + E_{002}z^2 + \\ E_{300}w_1^3 + E_{120}w_1l_1^2 + E_{111}w_1l_1z + E_{102}w_1z^2 \\ Z = F_{010}l_1 + F_{001}z + F_{110}w_1l_1 + F_{101}w_1z + F_{210}w_1^2l_1 + \\ F_{201}w_1^2z + F_{030}l_1^3 + F_{021}l_1^2z + F_{012}l_1z^2 + F_{003}z^3 \end{cases} \quad (1)$$

上式是 Offner 成像光谱仪的解析模型,也是用于生成系统点列图的解析表达式,其中模型参量 E_{ijk} 和 F_{ijk} (其中 i, j, k 分别对应式中的 0, 1, 2) 是系统的像差系数,是系统参量的函数, w₁ 和 l₁ 分别表示的是物点在 M₁ 上投射点的 (y, z) 坐标。可通过该解析模型生成的系统点列图,较准确地分析系统的成像质量。

2.2 单光栅像差理论

PRIETO-BLANCO 等人于 2006 年提出了基于

单光栅像差理论的解析方法,因为通过对光栅衍射特性的分析可以类推到 Offner 成像光谱仪结构中。又因为由凹面镜出射的光,再经凸面光栅衍射后的情况,可以等同于由凹面镜反射后的光,在凸面光栅上成虚像,再把此虚像当成实物点经一凹面光栅后进行衍射的情形,因此,通过描绘凹面光栅衍射过程,就可以将相关理论应用到凸面光栅。因此,对于 Offner 成像光谱仪像差理论的分析,大都应用的是此理论。

2.2.1 子午弧矢聚焦曲线相交 该方法是基于单光栅像差理论,由 PRIETO-BLANCO 等人于 2006 年提出的^[10],在保证罗兰圆配置的条件下,使子午和弧矢聚焦曲线在某一波长处相交或相切,来消除中心波长的像散。

像散产生的原因为子午像点与弧矢像点之间存在的距离,因此,要想获得零像散点,就要求这个距离值为 0,即通过计算所对应的物像位置关系,就可以来得到消像散像。图 2 为成像光谱仪简化结构图, I_s 和 I_m 分别表示的是物点所成的弧矢像点和子午像点, C 为系统的公共球心。通过像散点的物理含义(即 I_s 与 I_m 之间的距离),可以将其表示为:

$$I = CI_s \sin(\varphi_m' - \varphi_s') \quad (2)$$

式中, φ_m' 和 φ_s' 分别为子午与弧矢像与系统 x 轴所成夹角。因此,当满足 $\varphi_s' = \varphi_m'$ 时, $I(I_s I_m)$ 就为 0,即得到消像散点。然而,与上式对应的只有某一特定波长 λ ,此时,子午像与弧矢像相交。另外一种设计就是使子午像与弧矢像在 λ 处相切,来达到消像差的目的。

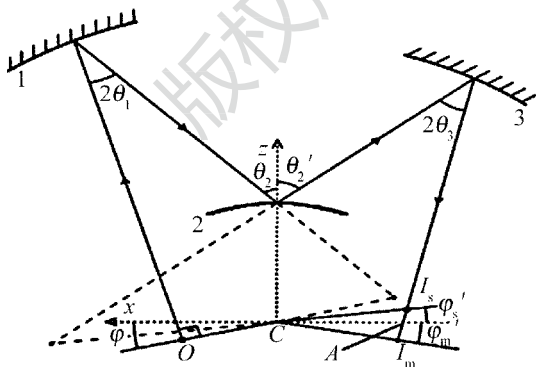


图2 成像光谱仪简化结构图

2.2.2 凹面光栅衍射理论 由于凹面光栅的衍射理论,完全可以应用到凸面光栅理论中来,因此, PRIETO-BLANCO 等人于 2009 年应用波动光学原理对凹面光栅的成像特点进行了详尽的分析^[24]。该研究过程中得到的表达式更为简单,便于设计,能

更好地应用到 Offner 成像光谱仪的研究工作中。图 3 是该理论的原理图。图中, A 为点光源,其对应的极坐标为 $(r_0, \theta_0, \alpha_0)$, B 为点光源 A 所成的像,其衍射级次为 m , B 的坐标为 $(r_1, \theta_1, \alpha_1)$ 。其中, r_0, r_1 分别表示物点 A 与像点 B 距离光栅顶点的距离, θ_0 和 θ_1 分别是参考光线的入射角和衍射角,而 α_0 和 α_1 是入射平面和衍射平面与 $x-z$ 平面所成的角度。

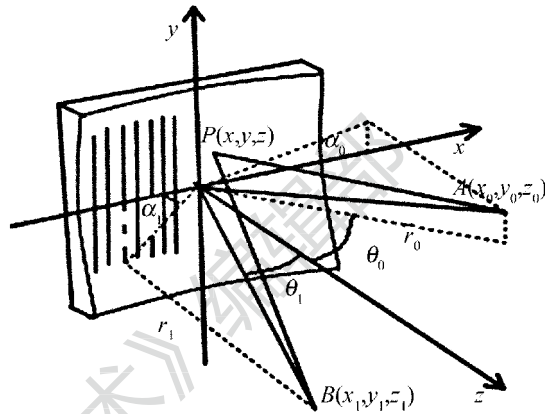


图3 凹面光栅衍射原理图

首先,根据凹面光栅成像理论,定义光程函数为从 A 点到 B 点的光程(与光栅的交点为 P)加上由光栅周期结构所决定的相位变化。即:

$$J = AP + PB + m \frac{\lambda x}{d} = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} + \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2} + m \frac{\lambda x}{d} \quad (3)$$

式中, d 表示光栅常数。对 J 进行泰勒级数展开,以及根据费马原理可以得到:

$$\sin\theta_0 \cos\alpha_0 + \sin\theta_1 \cos\alpha_1 = m \frac{\lambda}{d} \quad (4)$$

$$\sin\theta_0 \cos\alpha_0 + \sin\theta_1 \cos\alpha_1 = 0 \quad (5)$$

进一步求解 J 的 2 阶导数,并通过代数计算,得到消像散成像条件,如下式所示:

$$\left(\frac{1 + \cos^2\theta_0}{r_0} + \frac{1 + \cos^2\theta_1}{r_1} - 2 \frac{\cos\theta_0 + \cos\theta_1}{R} \right) = \left(\frac{\sin^2\theta_0}{r_0} - \frac{\sin^2\theta_1}{r_1} \right)^2 + 4 \frac{\sin^2\theta_0 \sin^2\theta_1}{r_0 r_1} \cos^2(\alpha_1 - \alpha_0) \quad (6)$$

对(6)式进行讨论:(1)当 $\alpha_0 = \alpha_1 = 0$,对应的是面内结构,如果 $r_0 \rightarrow \infty, \theta_1 = 0$,那么,就可以得出像的位置 $r_1 = \frac{R}{1 + \cos\theta_0}$,其中 R 为光栅半径,该结构称为沃兹沃斯装置,对应的当 $r_1 \rightarrow \infty, \theta_0 = 0$ 时,所成

的像同样具有消像散特性;(2)当 $\alpha_0 = \alpha_1 = 0$ 时,也是一种面内结构,此时 $\frac{\sin^2 \theta_0}{r_0} = -\frac{\sin^2 \theta_1}{r_1}$,可以看出 r_0 与 r_1 的符号相反,证明物点与像点中有一个是虚物点,该结构可以为装置提供汇聚光束或应用于视觉装置如分光镜等;(3)当 $\alpha_0 - \alpha_1 = \pm \frac{\pi}{2}$ 时,属于面外结构,此时 $\frac{\sin^2 \theta_0}{r_0} = \frac{\sin^2 \theta_1}{r_1}$ 。由(6)式可以得出:

$$r_0 \sin^2 \theta_1 = r_1 \sin^2 \theta_0 = R \frac{1 - \cos^2 \theta_0 \cos^2 \theta_1}{\cos \theta_0 + \cos \theta_1} \quad (7)$$

再由已知条件得出:

$$\sin \theta_1 = \sin \theta_0 \tan |\alpha_0| \quad (8)$$

$$\sin \theta_0 = m \frac{\lambda}{d} \cos \alpha_0 \quad (9)$$

这样,就可以由(6)式、(7)式得出物像距离关系为:

$$\frac{r_1}{r_0} = \tan^2 \alpha_0 \quad (10)$$

通过上述分析可以得出,在保证消像散的条件下,要想使物像点都为实物点,需要保证条件(3),此时可以称此结构为正交结构。取 $\alpha_0 = \pm \frac{\pi}{4}$ 时,可以得到一对称结构:

$$\begin{cases} \theta_0 = \theta_1 \\ r_1 = r_0 = \frac{R}{2} \left(\cos \theta_0 + \frac{1}{\cos \theta_0} \right) \end{cases} \quad (11)$$

2.3 基于光程函数分析方法

2010年,GONZÁLEZ-NÚÑEZ等人针对 Offner 成像光谱仪结构,应用光程函数(light path function, LPF)解析的方法对该结构进行了分析^[25]。通过对 LPF 的计算可以对任意物像位置的成像特点进行研究,并且可以避免由衍射光栅产生的中间像点所带来的复杂的解析过程。LPF 的级数展开式决定了成像光谱的像差大小,因此可以以此来获得消像差的光谱仪结构。

图4即为 Offner 成像光谱仪结构图,这里光程定义为经光栅衍射之前的光程 L 以及经光栅衍射之后的光程 L' 再加上光栅的刻线函数,因此可以得出:

$$L = L + L' + mg\lambda \tilde{x} = OP_1 + P_1P_2 + P_2P_3 + P_3I + mg\lambda \tilde{x} \quad (12)$$

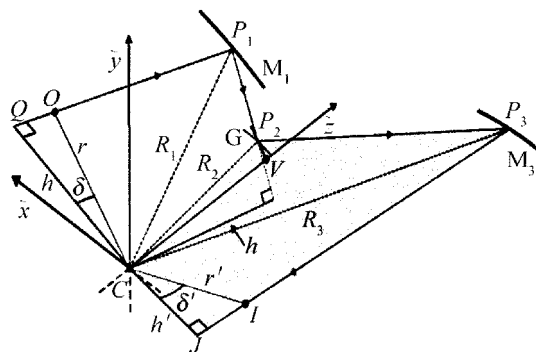


图4 LPF 理论原理图

式中, g 表示光栅常数, L 与 L' 均可以由图4中的已知量表示出来, \tilde{x} 是为了简化计算所选择的合适的坐标系, 可通过坐标转换进行还原^[25]。如前所述, 对 L 进行级数展开, 就可以对其 2 阶像差以及高阶像差进行分析。

3 两种结构介绍

针对第2节中对 Offner 成像光谱仪像差理论的分析, 可以得出存在两种特殊的结构, 使成像光谱仪具有好的成像质量, 下面, 就对这两种结构在消像差方面贡献叙述如下。

3.1 面内结构

如第2.2.2节中所述, 当 $\alpha_1 = \alpha_0 = 0$ 时, 对应的是面内结构, 其结构参量符合以下两等式:

$$\frac{\cos^2 \theta_0}{r_0} + \frac{\cos^2 \theta_1}{r_1} = \frac{\cos \theta_0 + \cos \theta_1}{R} \quad (13)$$

$$\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_1} = \frac{\cos \theta_0 + \cos \theta_1}{R} \quad (14)$$

其中与(13)式对应的是子午成像面, 与(14)式对应的是弧矢成像面, 在 0 级衍射或镜面反射的情况下, (14)式可以叙述为系统的物点、反射镜的曲率中心、及弧矢像点处于同一直线上。

对于面内结构的应用, 一般采用的是罗兰圆设计^[14], 即入射狭缝的中心位于第一凹面反射镜的罗兰圆上。由理论计算可知, 此时, 在不考虑入射波长的情况下, 物点 O 所成的子午像也位于该罗兰圆上, 并且, 此时子午像具有无彗差的特点。根据(13)式还可以计算出: 如果物点与光栅顶点的距离 $r_0 = R \cos \theta_0$, 那么相应的像距(像点到光栅顶点的距离) $r_1 = R \cos \theta_1$ 。而物点 O 对应的弧矢像点就不在此罗兰圆上, 这就使得子午像面的像散成为主要像差。

3.2 正交结构

当 $\alpha_1 = \alpha_0 \pm \frac{\pi}{2}$ 时, 对应的 Offner 成像光谱仪结

构为正交结构,即成像光谱仪的入射平面与衍射平面相互垂直。此时,其结构参量符合以下两等式:

$$\frac{\cos^2\theta_0}{r_0} + \frac{1}{r_1} = \frac{\cos\theta_0 + \cos\theta_1}{R} \quad (15)$$

$$\frac{1}{r_0} + \frac{\cos^2\theta_1}{r_1} = \frac{\cos\theta_0 + \cos\theta_1}{R} \quad (16)$$

如前所述,(9)式给出了在正交结构条件下,物点的角坐标位置与入射波长,光栅刻线间距,及衍射级次之间的关系。从(9)式、(15)式和(16)式,可以得到与一特殊物点对应的两像散线的中心坐标位置。对于以上这些等式的解,PRIETO-BLANCO 等人在参考文献[12]中给出了简单解析。针对这种结构,存在两个特殊的解:(1)当物距 $r_0 = R\cos\theta_0$

时,其像由(15)式确定,即 $r_1 = \frac{R}{\cos\theta_1}$,此时该光束所

成像具有无彗差的特点;(2)当物距 $r_0 = \frac{R}{\cos\theta_0}$ 时,其

像由(16)式确定,即 $r_1 = R\cos\theta_1$,同样,该光束所成像也具有无彗差的特点。从上述讨论可以看出,以上两种情形,可以通过光束反转而互相推导得出,这对于 Offner 成像光谱仪的设计是非常重要的。

由第 2.2.2 节中叙述可知,正交结构还可以使在特定波长 λ_q 条件下,入射狭缝的中点 O 所成的像具有无像散的特点。其基本思想是得到从凸面镜出射的两虚像点位置,然后,这两个像点经光栅再次成像在垂直平面上,由此获得的像点通过三镜 (M_3) 再成像的特性同一镜 (M_1) 的情况相同,因此,最后两像点在 I 点处重合。也可以说,存在一物点 O 的位置,可以使物点到一镜的距离等于从最终像点 I 到三镜的距离。只要找到该物点的位置就可以对 Offner 成像光谱仪进行设计了。

通过上述讨论可以发现,正交结构的 Offner 成像光谱仪在消像差方面更具有优势,该结构在利用同心结构无彗差特性的同时,找到了一物像点的对应位置,使得所成像点具有无像散的特点,这对于消像差 Offner 成像光谱仪的设计提供了帮助。

4 总结与展望

随着空间技术的发展,具有高成像质量的光谱仪器越来越受到人们的关注,对其研究也逐渐深入。通过解析点列图理论、单光栅像差理论及光程函数分析方法对 Offner 成像光谱仪像差理论进行分析,得到两种结构,可以在一定程度上减小像差,即面内

结构及正交结构,可为 Offner 成像光谱仪的设计提供帮助。但目前,对消像差 Offner 成像光谱仪的优化设计,大多是对等间距刻线的凸面光栅,并在特定波长下,采用点光源代替的方法进行讨论的,而且主要消除的像差是像散项,并没有对其它像差进行讨论。因此,针对不同刻线分布的凸面光栅 Offner 成像光谱仪的成像特点分析,以及对减小 Offner 成像光谱仪其余像差的优化设计以提高其成像质量,将是未来的研究趋势。

参 考 文 献

- [1] ZHU Sh B, JI Y Q, GONG G B, *et al.* Optical design of prism-grating-prism imaging spectrometers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(9): 2270-2273 (in Chinese).
- [2] GAT N. Imaging spectroscopy using tunable filter: a review [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2000, 4056: 50-64.
- [3] XIE H B, ZHU X Ch, LI E Y, *et al.* An emitting optical system design for laser panorama detection [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(2): 191-194 (in Chinese).
- [4] HUANG Y Sh, CHEN J B. Fourier analysis of Offner imaging spectrometer composed of a convex grating [J]. *Optical Instruments*, 2007, 29(6): 40-43 (in Chinese).
- [5] TONG Y J, WU G, ZHOU Q, *et al.* Design method of offner-type imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 1148-1152 (in Chinese).
- [6] HUANG Y Sh, NI Zh J, ZHUANG S L. Research of the concentric optical system of grating spectrometers [J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(6): 38-42 (in Chinese).
- [7] QU W J, XIE H, HU Q G, *et al.* Optical filtering characteristics for Gaussian beam passing through of diffractive gratings [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(4): 540-543 (in Chinese).
- [8] MERTZ L. Concentric spectrographs [J]. *Applied Optics*, 1977, 16(12): 3122-3124.
- [9] HUANG Y Sh, NI Zh J. Research of the concentric three-reflection optical system [J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(2): 42-46 (in Chinese).
- [10] PRIETO-BLANCO X, MONTERO-ORILLE C, COUCE B, *et al.* Analytical design of an Offner imaging spectrometer [J]. *Optics Express*, 2006, 14(20): 9156-9168.
- [11] LUCKE R L. Out-of-plane dispersion in an Offner spectrometer [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(7): 073004.
- [12] PRIETO-BLANCO X, MONTERO-ORILLE C, GONZÁLEZ-NÚÑEZ H, *et al.* The Offner imaging spectrometer in quadrature [J]. *Optics Express*, 2010, 18(12): 12756-12769.
- [13] FISHER J, ANTONIADES J. Hyperspectral imaging sensor for the coastal environment [J]. *Proceedings of the SPIE*, 1998, 3482: 179-186.
- [14] CHRISP M P. Convex diffraction grating imaging spectrometer: US, 5880834 [P]. 1999-05-09.
- [15] MOUROULIS P. Compact infrared spectrometers [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2009, 7298: 729803.
- [16] KWO D, LAWRENCE G, CHRISP M. Design of a grating spectrometer from a 1:1 Offner mirror system [J]. *Proceedings of the*

- SPIE,1987,818: 275-279.
- [17] CHRISP M P. Aberrations of holographic toroidal grating systems [J]. Applied Optics,1983,22(10):1508-1518.
- [18] LÜ L J. Aberration theory of plane symmetric grating systems [J]. Synchrotron Radiation,2008,15(4):399-410.
- [19] GOTO K, KUROSAKI T. Canonical formation for the geometrical optics of concave gratings[J]. Journal of the Optical Society of America,1993,A10(3):452-465.
- [20] NAMIOKA T, KOIKE M, CONTENT D. Geometric theory of the ellipsoidal grating[J]. Applied Optics,1994,33(31):7261-7274.
- [21] MASUI S, NAMIOKA T. Geometric aberration theory of double element optical systems[J]. Journal of the Optical Society of America,1999,A16(9):2253-2268.
- [22] PRIETO-BLANCO X, GONZÁLEZ-NUÑEZ H, de la FUENTE R. Off-plane anastigmatic imaging in Offner spectrometer [J]. Journal of the Optical Society of America,2011,A28(11):2232-2239.
- [23] LIU H G, WU G, LING Q, *et al.* Modelling of Offner imaging spectrometers and aberration analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3):0322001.
- [24] PRIETO-BLANCO X, MONTERO-ORILLE C, GONZÁLEZ-NUÑEZ H, *et al.* Imaging with classical spherical diffraction grating: the quadrature configuration [J]. Journal of the Optical Society of America,2009,A26(11):2400-2409.
- [25] GONZÁLEZ-NUÑEZ H, PRIETO-BLANCO X, de la FUENTE R. Pupil aberrations in Offner spectrometers [J]. Journal of the Optical Society of America,2012,A29(4):442-449.

《激光技术》编辑部

版权所有 ©