

一步法设计单色仪凹面全息光栅

曾瑾^{1,2}, 巴音贺希格^{1*}, 李文昊¹, 张金平^{1,2}

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

摘要 凹面全息光栅是光谱分析仪器的核心器件之一, 其成像质量直接决定了光谱分析仪器的分辨本领。利用光程函数理论设计凹面全息光栅是一个繁琐的求解非线性方程组的过程, 该过程分两步进行, 每步需要求解四个非线性方程。分两步求解不但过程麻烦, 还不可避免地引入了取舍误差, 降低了最优参数的精度。为了解决该问题, 本文提出了一种设计单色仪凹面全息光栅的新方法——一步法, 该方法不但可以简化求解过程、降低最优参数的误差, 还可以方便地控制整体像差的变化趋势。采用有较强全局搜索能力的遗传算法求解该方法中非线性方程的极值问题, 并与传统的方法对比验证了该方法的可行性和正确性, 结果表明, 一步法不但在方法上比两步法简便, 其设计结果还优于两步法。

关键词 衍射光栅; 凹面全息光栅; 单色仪; 消像差; 遗传算法

中图分类号: O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)09-2586-04

引言

随着光谱分析技术的广泛应用^[1], 作为分光仪器关键器件的衍射光栅得到了较快的发展。由于凹面全息光栅具有色散、聚焦和消像差的功能, 越来越受人们的重视。从1883年Rowland建立凹面光栅理论开始, 随后的近100年里不少学者对凹面光栅的特性进行了不同程度的研究, 1974年日本的Noda等在完善前人研究成果的基础上建立了一套全息光栅光程函数理论^[2], 他们利用该理论指导设计了Seya-Namioka单色仪凹面全息光栅并给出了具体的设计方法^[3], 此后的凹面全息光栅设计多以该理论为指导并以文献^[4]中的方法为基础^[4-7], 本文称这种方法为经典法, 其分两步进行, 第一步求解满足聚焦条件的光栅的使用参数, 第二步利用第一步求出的使用参数求取满足消像差条件的光栅的记录参数, 每一步都需要解四个非线性方程, 完成一块凹面全息光栅的设计需要求解八个非线性方程, 处理起来比较繁琐, 而且上一步的求解结果代入下一步时会产生取舍误差, 降低了最优参数的精度。

本文提出了一种一步到位的全息光栅设计方法——一步法, 该方法不但可以克服经典法的缺点, 还可以方便地控制

整体像差的变化趋势。采用了新的求解非线性方程的方法——遗传算法^[8,9]对该方法的目标函数进行求解, 遗传算法的搜索过程既不受目标函数是否连续性的约束, 也没有目标函数必须可导的要求, 已被证明能较好的处理复杂的非线性问题^[10-12]。通过与经典方法对比, 验证了一步法的可行性和正确性, 结果表明, 一步法设计的单色仪凹面全息光栅较之经典法设计的有更好的消像差能力。

1 光程函数理论简介

单色仪结构如图1所示, 直角坐标系 x,y,z 的原点 O 为凹面全息光栅基底的顶点, x 轴指向光栅法线方向, z 轴沿着过光栅顶点处刻槽切线的方向。单色仪入出臂夹角为 $2K$, OC 为 $2K$ 的角平分线, θ 为光栅扫描时 OC 到 x 轴的转角, 由单色仪入缝中心点 A_0 发出的光线被光栅顶点 O 衍射后与像平面中心交于点 B_0 , 入缝上一点 A 发出的光线被光栅上点 P 衍射后与像面 Σ 交于点 B , 设光栅顶点 O 位于第0条刻槽上, 点 P 位于第 n 条刻槽上, 光线 APB 的光程函数为

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

其中, λ 为衍射光的波长, m 为衍射级次, 把各点坐标代入式(1)后展开可得

收稿日期: 2010-11-08, 修订日期: 2011-02-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(60478034)、国家“十一五”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

作者简介: 曾瑾, 女, 1985年生, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生 e-mail: zeng20031985@163.com

*通讯联系人 e-mail: bayin888@sina.com

$$F = F_{000} + \omega F_{100} + l F_{011} + \frac{1}{2} \omega^2 F_{200} + \frac{1}{2} l^2 F_{020} + \frac{1}{2} \omega^3 F_{300} + \frac{1}{2} \omega l^2 F_{120} + \omega l F_{111} + \frac{1}{8} \omega^4 F_{400} + \frac{1}{4} \omega^2 l^2 F_{220} + \frac{1}{8} l^4 F_{040} + \frac{1}{4} \omega^2 F_{202} + \dots \quad (2)$$

其中, $F_{ijk} = M_{ijk} + (m\lambda/\lambda_0)H_{ijk} = M_{ijk} + A_{ijk}(\sin\alpha + \sin\beta)$, ijk 分别为 $\omega l z$ 的指数, M_{ijk} 为光栅使用参数的函数, H_{ijk} 为光栅记录参数的函数, 具体表达式见文献[3], 每项 F_{ijk} 均对应特定的像差, 其中 F_{200} 为水平聚焦项, F_{020} 为像散项, F_{120} 为像散彗差项, F_{300} 为彗差项, F_{220} , F_{040} 和 F_{202} 分别为高级球差项。

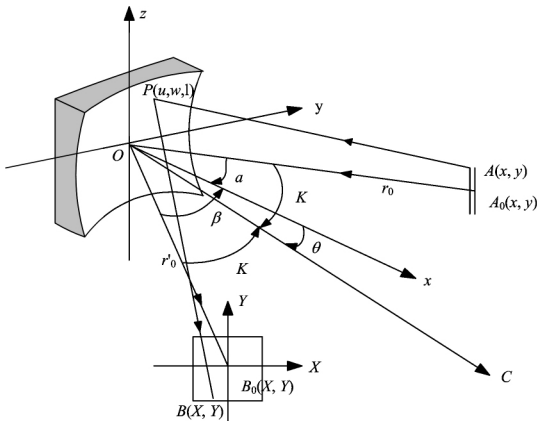


Fig 1 Schematic of monochromator

2 经典的设计方法

该方法的前提是求出主光线 A_0OB_0 的光程函数展式中像差项平方值在整个工作波段的积分

$$I_{ijk} = \int_{\theta(\lambda_{\min})}^{\theta(\lambda_{\max})} F_{ijk}^2 d\theta \quad (i + j + k \geq 2) \quad (3)$$

其中, λ_{\min} 和 λ_{\max} 为扫描范围两端的波长。经典设计方法分为两步, 第一步: 求解 $I_{200} = \text{minimum}$ 得满足单色仪水平聚焦条件的光栅的使用参数, 这要求求解如下四个非线性方程

$$\begin{aligned} \partial I_{200} / \partial \rho_A &= 0 & \partial I_{200} / \partial \rho_B &= 0 \\ \partial I_{200} / \partial K &= 0 & \partial I_{200} / \partial A_{200} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

其中, ρ_A 和 ρ_B 的定义见文献[4]。

第二步: 把第一步的求解结果代入式(3)并令 $\partial I_{ijk} / \partial A_{ijk} = 0$ 得与记录参数相关的项 A_{ijk} , 如果要消除彗差, 需求出 A_{200} , A_{300} 和 A_{120} 的值并代入下面四个非线性方程

$$\begin{aligned} d &= \lambda_0 / (\sin\delta - \sin\gamma) & A_{200} &= (d/\lambda_0) H_{200} \\ A_{300} &= (d/\lambda_0) H_{300} & A_{120} &= (d/\lambda_0) H_{120} \end{aligned} \quad (5)$$

如果要消除像散, 需求出 A_{200} , A_{300} 和 A_{020} 的值并代入下面四个非线性方程

$$\begin{aligned} d &= \lambda_0 / (\sin\delta - \sin\gamma) & A_{200} &= (d/\lambda_0) H_{200} \\ A_{300} &= (d/\lambda_0) H_{300} & A_{020} &= (d/\lambda_0) H_{020} \end{aligned} \quad (6)$$

这样看来, 不论是要消除全息光栅彗差还是象散, 都需要求解八个非线性方程。

3 一步法的原理

我们将扫描波段等间隔取 n 个波长: $\lambda_1, \dots, \lambda_n$, 令

$$I = \frac{1}{m!} \sum_{q=1}^m \omega_q \sum_{l=1}^{l=n} F_{ijk}^2(\lambda_l) = \text{minimum} \quad (i + j + k \geq 2) \quad (7)$$

来实现凹面全息光栅的消像差, 其中 ω_q 为每项像差系数项对应的权值, m 为消除像差的项数, 通过调节权重因子 ω_q , 我们可以方便地控制整体像差的变化趋势。若要消除光栅的彗差, 令 $ijk = 200, 120, 300$ 即可, 若要消除光栅的象散, 令 $ijk = 200, 020, 300$ 即可。这样, 不论是消单色仪凹面全息光栅的彗差还是象散, 我们仅需要求解一个非线性方程(7)式即可。

4 一步法的对比验证

已知单色仪凹面全息光栅的参数为使用波长范围: $0 \sim 700$ nm, 记录波长: 457.93 nm, 基底半径: 500 mm, 光栅常数: 1/600 mm, 使用级次: -1 , 单色仪入出臂的夹角: 69.733° 。待求参数: $\rho_A, \rho_B, \rho_C, \rho_D, \gamma, \delta$ (具体定义见文献[4])。将已知条件带入并对式(7)优化得到的消彗差结果和消象散结果如表 1 所示, 图 2 和图 3 是与文献[4]中相应的点列图的对比, 可明显看出, 一步法所设计的单色仪凹面全息光栅成像质量优于经典法所设计的。

Table 1 The parameters of the concave grating designed by the one step method

优化参数	ρ_A	ρ_B	ρ_C	ρ_D	γ	δ
消彗差	1.203	1.234	0.974	0.838	-50.190°	-29.560°
消象散	1.219	1.219	1.359	0.990	-63.019°	-38.054°

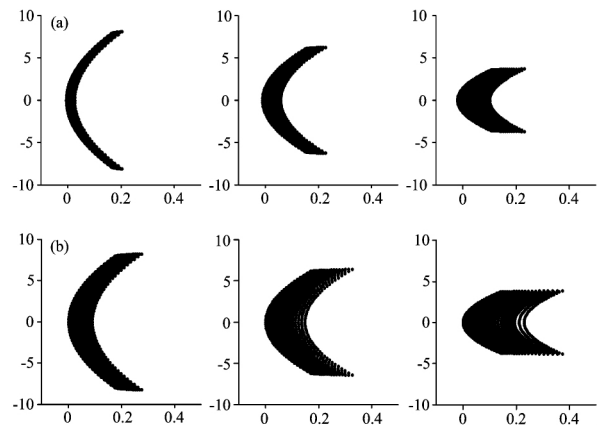


Fig 2 Spot diagrams constructed for the coma-corrected concave gratings

(a): Designed by the one step method; (b): Designed in the reference 3. The wavelengths are 200, 400 and 700 nm from left to right.

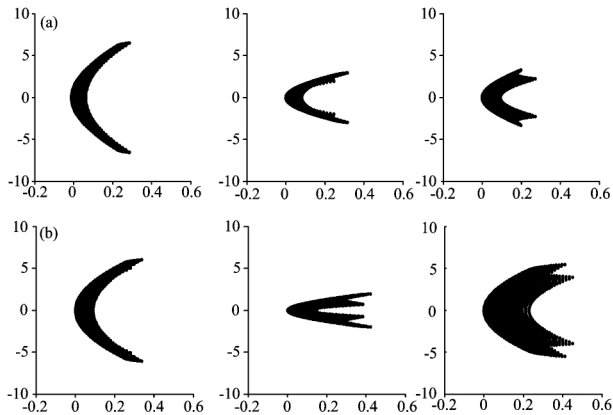


Fig 3 Spot diagrams constructed for the astigmatism-corrected concave gratings

(a): Designed by the one step method; (b): Designed in the reference 3. The wavelengths are 200, 400 and 700 nm from left to right.

下面从数值上对一步法和经典法的设计结果进行分析,表 2 和表 3 分别给出了这两种方法设计的消彗差单色仪凹面全息光栅和消象散单色仪凹面全息光栅在 $\lambda_i = 200, 400$ 和 700 nm 处各项初级像差系数的值。由表 2 可看出,在各波长处,前者的水平聚焦像差系数幅值大于后者的,其象散系数幅值比后者的稍小但其彗差系数幅值却远小于后者的,这和图 2 中看到的现象一致,即在同一波长处,两方法得到的点列图象散几乎一样,但前者消彗差效果却远远好于后者。这应该是因为水平聚焦像差系数其数值本身较小(10^{-4} 量级),相比彗差而言,其对总体像差的影响不大,所以前者的总体像差比后者要小。由表 3 可看出,前者在前两个波长处消象散效果稍次于后者,但在 700 nm 处其消象散效果和消彗差效果却大大优于后者,这和图 3 中看到的现象一致。

References

- [1] WANG Yun, XU Ke-xin, CHANG Min(王云, 徐可欣, 常敏). Optical Instrument(光学仪器), 2006, 28(3): 4.
- [2] Noda H, Namioka T, Seya M. JOSA, 1974, 64(8): 1031.
- [3] Noda H, Namioka T, Seya M. JOSA, 1974, 64(8): 1043.
- [4] McKinney W R, Palmer C. Appl. Opt., 1987, 26(15): 3108.
- [5] Content D, Namioka T. Appl. Opt., 1993, 32(25): 4881.
- [6] CHEN Ji-zhong, LIN Zhong, MENG Qing-hua(陈吉中, 林中, 孟庆华). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 1997, 5(1): 96.
- [7] LI Chao-ming, WU Jian-hong, TANG Min-xue(李朝明, 吴建宏, 唐敬学). Laser Journal(激光杂志), 2005, 26(2): 57.
- [8] ZHOU Ming, SUN Shu-dong(周明, 孙树栋). The Principle and Application of Genetic Algorithm(遗传算法原理与应用). Beijing: National Defense Industry Press(北京: 国防工业出版社), 1999.
- [9] WANG Xiao-ping, CAO Li-ming(王小平, 曹立明). Genetic Algorithm—Theory, Application and Software Implement(遗传算法—理论与应用与软件实现). Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press(西安交通大学出版社), 2002.
- [10] WANG Li-ping, ZHANG Li-chao, HE Feng-yun, et al(王丽萍, 张立超, 何锋赞, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2009, 17(5): 1020.
- [11] ZHANG Huai-zhu, XIANG Chang-bo, SONG Jian-zhong, et al(张怀柱, 向长波, 宋建中, 等). Optics and Precision Engineering(光学精密工程), 2010, 30(9): 2581.
- [12] LI Xian-li(李献礼). Computer Science(计算机科学), 2007, 34(10): 217.

Table 2 Values of the aberration coefficients for the coma-corrected gratings (a) designed by the one step method, (b) designed in the reference 3

波长 /nm	设计方法	$F_{200} / \times 10^4$	F_{020}	F_{300}	F_{120}
200	a	-3.707 3	0.640 8	0.007 4	-0.030 5
200	b	0.406 0	0.642 6	0.031 2	0.003 0
400	a	-4.841 1	0.494 4	0.027 2	-0.033 4
400	b	-0.099 2	0.497 7	0.057 8	0.001 6
700	a	-3.047 0	0.291 9	0.046 7	-0.042 1
700	b	1.019 7	0.297 5	0.086 4	-0.004 5

Table 3 Values of the aberration coefficients for the astigmatism-corrected gratings (a) designed by the one step method, (b) designed in the reference 3

波长 /nm	设计方法	$F_{200} / \times 10^4$	F_{020}	F_{300}	F_{120}
200	a	3.807 4	0.494 5	0.012 0	-0.308 2
200	b	0.406 0	0.449 0	0.031 1	0.460 9
400	a	3.076 0	0.200 9	0.021 3	0.615 4
400	b	-0.099 2	0.110 4	0.057 8	0.917 6
700	a	3.982 7	-0.222 4	0.023 9	1.072 1
700	b	1.019 7	-0.380 4	0.086 4	1.598 4

5 结论

提出了一种可以一步到位的设计凹面全息光栅的方法——一步法,对比验证该方法的可行性与正确性。结果表明,该方法较之经典的凹面全息光栅设计方法有以下优点:

- (1)降低了凹面全息光栅设计过程的繁琐性。
- (2)减小了凹面全息光栅最优参数的精度误差。
- (3)可以方便地控制整体像差的变化趋势。
- (4)可以得到更好的消像差效果。

One Step Method to Design Concave Holographic Grating for Monochromator

ZENG Jin^{1,2}, Bayanheshig^{1*}, LI Wen-hao¹, ZHANG Jin-ping^{1,2}

1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The present paper put forward a new method, named one step method, to design concave holographic grating for a monochromator. This new method is simple and direct and easy to understand. Additionally, in this new method, we can control the whole aberrations of concave grating very well. Genetic algorithm was applied to optimize the objective function of this new method for its strong ability to search the extremum of nonlinear functions and a comparison was made between this new method and the classical method. The result shows that, for coma correction or astigmatism correction, the imaging properties of the concave grating designed by the new method is much better than the grating designed by the classical method.

Keywords Diffraction grating; Concave holographic gratings; Monochromator; Aberration-corrected; Genetic algorithm

(Received Nov. 8, 2010; accepted Feb. 19, 2011)

* Corresponding author