

Ⅳ型凹面全息光栅参数误差对光谱性能的影响及补偿

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 在Ⅳ型凹面全息光栅制作和使用过程中,各参数误差会影响其光谱性能。光栅均方根法优化函数表达式复杂且不能给出光谱的带宽。由费马原理推导出一种数值处理较为简单且能直接描述光谱带宽的光栅优化函数——平方和法优化函数,验证了该函数的正确性。采用该函数对Ⅳ型凹面全息光栅使用参数和记录参数在参考平面内外的误差对光谱性能的影响及补偿做了定量分析,结果表明,Ⅳ型凹面全息光栅一个使用参数或记录参数在参考平面内的误差可通过分别调节其他使用参数或记录参数进行补偿,且当记录参数的误差不改变光栅常数时,可以通过调节使用参数对其进行补偿;而光栅记录参数在参考平面外的误差只能通过调节记录参数与参考平面的距离进行补偿。

关键词 光栅;凹面全息光栅;误差补偿;光谱带宽

中图分类号 O433.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.1005005

Effect of Type-Ⅳ Concave Holographic Grating Parameter Errors on Spectral Performance and Their Compensation

Zeng Jin^{1,2} Bayanheshig¹ Li Wenhao¹ Zhang Jinping^{1,2}

(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)

Abstract There are errors between the theoretical values and the actual values for the parameters of type-Ⅳ concave holographic grating during its recording and using process, which will affect the spectral performance of the concave holographic grating. A simple grating optimization function which can be used to describe the spectral width is derived from the Fermat's principle and a comparison to the root-mean-square (RMS) optimization function which is complex and disable to describe the spectral width is made to justify its validity. The errors are divided into two categories by their location relative to the reference plane and a quantitative analysis of their effects on the spectral performance of type-Ⅳ concave holographic grating is made. The results indicate that the error of one recording parameter or using parameter in the reference plane can be compensated by adjusting other recording parameters or other using parameters, and the recording parameter errors can be compensated by adjusting the using parameters when the grating constant is not changed; the compensation for the parameter error outside the reference plane can only be made by adjusting other parameter's distance from the reference plane.

Key words gratings; concave holographic grating; error compensation; spectral width

OCIS codes 050.2770; 300.6170; 300.3700

收稿日期: 2011-04-19; **收到修改稿日期**: 2011-05-25

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)、吉林省科技发展计划项目(20070523,20086013)和国家创新方法工作专项项目(2008IM040700)资助课题。

作者简介: 曾 瑾(1985—),女,博士研究生,主要从事Ⅳ型凹面全息光栅设计与制作工艺等方面的研究。

E-mail: zeng20031985@163.com

导师简介: 巴音贺希格(1962—),男,博士,研究员,主要从事光栅理论、光栅制作及光谱技术等方面的研究。

E-mail: bayin888@sina.com(通信联系人)

1 引 言

凹面光栅具有色散和聚焦功能^[1,2],便于仪器的小型化、轻量化和便携化。由于在凹面基底上刻划光栅比较困难,全息技术出现后,研究人员开始利用全息方法制作凹面光栅^[3],凹面全息光栅的设计理论和制作技术也随着科学技术的发展而日趋成熟^[4~9]。目前,人们已经能制作出性能较高的各种凹面全息光栅^[10~15],其中Ⅳ型凹面全息光栅又被称为单色仪光栅^[16],已被广泛应用于生物化学、食品检验、地质勘探、环境科学和生命科学等分析测试领域。Ⅳ型凹面全息光栅加上固定的入射狭缝及出射狭缝就可构成一个完整的分光系统模块,通过旋转光栅来实现光谱扫描。因此,无论光栅使用时仪器入、出臂及两者夹角的误差,还是光栅制作时两个点光源的空间位置误差,都会影响Ⅳ型凹面全息光栅以及单色仪的光谱性能。在光栅设计、制作和使用中对这些误差可能造成的影响进行定量分析,并给出相应的补偿方法是十分必要的。

通常将Ⅳ型凹面全息光栅制作和使用系统中主入射光线和主衍射光线以及光栅的法线所确定的平面称为系统的参考平面^[17]。在实践中发现,以参考平面为基准面,对凹面全息光栅的参数误差进行分析较为方便。可将凹面全息光栅的参数误差分为两类:一类为参考平面内误差;另一类为参考平面外误差。文献^[18]对平场凹面全息光栅参数在参考平面内的误差做了较为深入的研究,但未谈及其参数在参考平面外的误差,但从实际制作及使用的角度考虑,由于光路摆设及仪器装调等原因,这两类误差都是存在的。Ⅳ型凹面全息光栅同样会存在类似问题,但至今未见相关文献报导。

目前,均方根(RMS)法^[19]由于其独特的优点而被用于各种高精度光谱仪器的设计中,该方法先求出光栅衍射光像点的坐标值,然后再求出这些坐标值的均方差,其目标函数要涉及一系列多次非线性方程的组合,表达式较为复杂且收敛速度较慢。由于对凹面全息光栅的每个参数误差做补偿分析时,需对目标函数逐个进行再次优化,用均方根法处理不够简捷。更重要的是,均方根法的目标函数不能直接表示光谱的带宽,不便于对光谱性能的分析讨论。鉴于此,本文从费马原理出发,推导出光栅衍射光像点与理想像点的偏移量并以此代替均方根法目标函数中像点坐标值的均方差,给出一种数值处理简单且物理意义更为明确的表示光谱带宽的光栅优化函数,称为平方和法优化函数,并证明了该函数

的正确性。以平方和法优化函数为基础,考察了Ⅳ型凹面全息光栅记录参数和使用参数在参考平面内外的误差对其光谱性能的影响,并提出了对上述参数误差进行补偿的方法,旨在指导Ⅳ型凹面全息光栅的设计、制作和应用。

2 凹面全息光栅平方和法优化函数

凹面全息光栅系统结构如图1所示,直角坐标系XYZ的原点O在光栅基底的顶点,X轴为光栅基底的法线,Z轴平行于过点O的光栅刻槽,XOY平面为光栅系统的参考平面。由点光源C,D发出的球面波在光栅基底表面干涉形成光栅的刻线条纹。点C到点O的距离为 r_C ,CO与光栅法线的夹角为 γ ;点D到点O的距离为 r_D ,DO与光栅法线的夹角为 δ 。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 Σ 交于点 B_0 ,入缝上点A发出的光线被光栅基底表面点P衍射后与像平面交于点B。点 A_0 到点O的距离为 r_A , A_0O 与光栅法线的夹角为 α ;点 B_0 到点O的距离为 r_B , B_0O 与光栅法线的夹角为 β 。

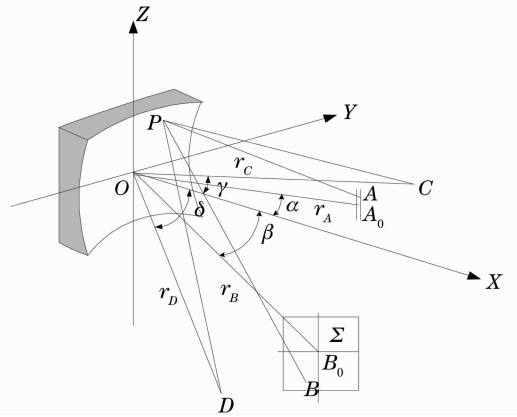


图1 凹面全息光栅系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of concave holographic grating system

光线APB的光程函数为

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

式中 m 为衍射光的级次, n 为从光栅顶点O算起,点P所在的刻槽数, λ 为衍射光的波长。将各点的坐标代入(1)式并进行级数展开可得

$$F = r_A + r_B + \omega F_{100} + l F_{011} + \frac{1}{2} \omega^2 F_{200} + \frac{1}{2} l^2 F_{020} + \frac{1}{2} \omega^3 F_{300} + \frac{1}{2} \omega l^2 F_{120} + \omega l F_{111} + \dots (2)$$

式中 ω, l 为点P在Y方向和Z方向的坐标, F_{ijk} 为光栅使用参数和记录参数的函数,其具体表达式见文献^[4]。

文献[16]介绍了目前存在的几种光栅优化函数的优缺点并给出了一种新的光栅优化函数。均方根

法优化函数,该函数可以满足各种高性能光谱仪器的设计要求,其表达式为

$$Q = \sum_{i=1}^n \omega_i Q(\lambda_i), \quad (3)$$

$$Q(\lambda_i) = \frac{1}{WLH} \int_{-H/2}^{H/2} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-W/2}^{W/2} (Y - \bar{Y})^2 d\tau d\omega dz + \frac{\mu}{WLH} \int_{-H/2}^{H/2} \int_{-L/2}^{L/2} \int_{-W/2}^{W/2} Z^2 d\tau d\omega dz = q_Y^2(\lambda_i) + \mu[q_Z^2(\lambda_i)], \quad (4)$$

$$q_Y^2(\lambda_i) = r_B^2 \sec^2 \beta \left\{ \frac{1}{12} W^2 f_{100}^2 + \frac{1}{360} [W^4 (2f_{200}^2 + 9f_{100} f_{300}) + 2L^4 f_{020}^2 + 2H^4 f_{002}^2] + \frac{1}{144} [2W^2 f_{100} (L^2 f_{120} + H^2 f_{102}) + L^2 H^2 f_{011}^2] \right\}, \quad (5)$$

$$q_Z^2(\lambda_i) = r_B^2 \left\{ \frac{1}{12} (L^2 g_{010}^2 + H^2 g_{001}^2) + \frac{1}{40} L^4 g_{010} g_{030} + \frac{1}{140} W^2 L^2 (g_{110}^2 + 2g_{010} g_{210}) + \frac{1}{144} H^2 [W^2 (g_{101}^2 + 2g_{001} g_{201}) + 2L^2 (g_{010} g_{012} + g_{001} g_{021})] \right\}, \quad (6)$$

式中 λ_i 为衍射光的波长, W 为光栅的宽度, L 为光栅的高度, H 为仪器入缝的高度, f_{ijk} 和 g_{ijk} 均为 F_{ijk} 的多次非线性组合函数,其表达式较为复杂繁琐,具体可见参考文献[16]。 $q_Y(\lambda_i)$ 的物理意义为像平面上所有像点坐标值在色散方向的均方根, $q_Z(\lambda_i)$ 的物理意义为像平面上所有像点坐标值在垂直色散方向的均方根,两者均用来表示像平面上像点的密集程度,不能直观地表示像平面上光谱的带宽,不便于对光谱性能的分析讨论。

由费马原理可知,若光栅表面点 P 的衍射光聚焦在理想像点处,其坐标 ω 和 l 必须同时满足 $\partial F / \partial \omega = 0$ 和 $\partial F / \partial l = 0$ 。不满足该条件的衍射光线的像点与理想像点会有一定程度的偏移,若像平面的法线与衍射光的夹角为 φ ,则该像点与理想像点在色散方向的偏移 δy 和垂直于色散方向的偏移 δz 为

$$\delta y = \frac{r_B}{\cos \varphi} \frac{\partial F}{\partial \omega}, \quad (7)$$

$$\delta z = r_B \frac{\partial F}{\partial l}. \quad (8)$$

若不考虑入缝的高度,依照(4)式将 δy 和 δz 进行积分并加权求和可得

$$Q_1(\lambda_i) = \frac{1}{WL} \int_{-W/2}^{W/2} \int_{-L/2}^{L/2} (\delta y)^2 dl d\omega + \frac{\mu}{WL} \int_{-W/2}^{W/2} \int_{-L/2}^{L/2} (\delta z)^2 dl d\omega = q^2(\lambda_i) + \mu[p^2(\lambda_i)], \quad (9)$$

$$q^2(\lambda_i) = \frac{r_B^2}{\cos^2 \varphi} \left\{ \frac{9}{320} F_{300}^2 W^5 L + \frac{1}{12} \left[\frac{1}{8} F_{300} F_{120} L^3 + (3F_{100} F_{300} + F_{200}^2) L \right] W^3 + \frac{1}{320} F_{120}^2 W L^5 + \frac{1}{12} (F_{100} F_{120} + F_{111}^2) W L^3 + F_{100}^2 W L \right\}, \quad (10)$$

$$p^2(\lambda_i) = \frac{r_B^2}{12WL} \left[\left(\frac{1}{12} F_{120}^2 L^3 + F_{111}^2 L \right) W^3 + F_{020}^2 W L^3 \right]. \quad (11)$$

由(10)和(11)式可以看出 $q(\lambda_i)$ 和 $p(\lambda_i)$ 的表达式只是 F_{ijk} 的非线性组合,比 $q_Y(\lambda_i)$ 和 $q_Z(\lambda_i)$ 的表达式要简单很多。 $q(\lambda_i)$ 的物理意义为像平面上所有像点与理想像点在色散方向的偏移,可以用来表示像平面上光谱的带宽; $p(\lambda_i)$ 的物理意义为像平面上所有像点与理想像点在垂直于色散方向的偏移,可以用来表示像平面上光谱的高度。此时,凹面全息光栅的优化函数为

$$Q_1 = \sum_{i=1}^n \omega_i Q_1(\lambda_i), \quad (12)$$

不妨称(12)式为光栅的平方和法优化函数。为了验证该方法的简单性和正确性,下面对该方法和均方根法的计算速度和优化结果进行比较。已知Ⅳ型凹面全息光栅的响应波长范围为 400~1000 nm,有效使用面积为 32 mm × 32 mm,使用光谱级次 $m = +1$,光栅常数 $d = 1/500$ mm,单色仪入出臂

$r_A = r_B = 64$ mm, 入出臂夹角为 12° 。待优化的参数为: 记录点光源 C 到光栅顶点的距离 r_C , CO 与光栅法线的夹角 γ , 记录点光源 D 到光栅顶点的距离 r_D , DO 与光栅法线的夹角 δ 。优化时所用的计算机内存为 1 GB, 计算精度为 1×10^{-8} , 在相同初值条件下平方和法得到最优结果的时间为 3.6 s, 而均方根法为 26.4 s。优化后的结果如表 1 所示, 可以看出两种方法设计的结果相近。对它们进行光线追迹的点列图如图 2 所示, 可以看出边缘波长处平方和法优

化的光栅彗差比均方根法的稍大一些, 其他波长处两种方法优化的结果较为吻合, 这表明平方和法优化结果正确, 能够用于光栅的优化设计。

表 1 均方根法和平方和法的优化结果

Table 1 Optimized results by RMS method and by square sum method

	r_C/mm	$\gamma/(\text{^\circ})$	r_D/mm	$\delta/(\text{^\circ})$
RMS	87.50	39.30	119.78	58.67
Square sum	88.17	39.01	119.58	58.27

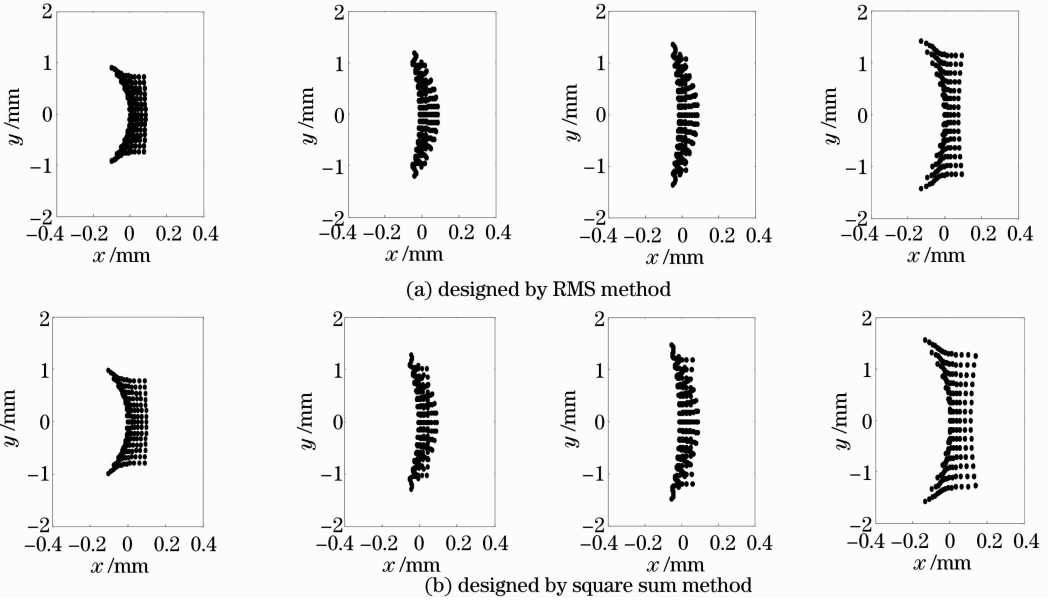


图 2 光线追迹点列图, 从左到右波长依次为 400, 600, 800 和 1000 nm

Fig. 2 Ray-tracing spot diagrams as wavelengths are 400, 600, 800 and 1000 nm from left to right

3 误差分析及补偿

由于凹面全息光栅使用过程和记录过程不能同时实现, 对这两个过程中参数的误差进行分开讨论较为合适。考虑到单色仪入缝本身有一定的高度, 其中心点略高于或略低于参考平面对光谱性能不会产生太大影响, 所以不必对使用参数与参考平面的偏离误差进行讨论, 只需考察以下三种误差即可: 1) IV 型凹面全息光栅使用参数在参考平面内的误差; 2) IV 型凹面全息光栅记录参数在参考平面内的误差; 3) IV 型凹面全息光栅记录点光源与参考平面的偏离误差。

光栅的光谱性能主要由光谱带宽 $q(\lambda_i)$ 决定, 设距离参数误差为 ± 1 mm, 角度参数误差为 ± 0.01 rad, 以表 1 中的均方根法优法参数为例, 考察了上述三种误差对光谱带宽的影响及相应的补偿方法。为了便于表示, 以后的图文中均省略了距离和角度的单位。

3.1 IV 型凹面全息光栅使用参数在参考平面内的误差

IV 型凹面全息光栅使用参数为单色仪的入臂 r_A , 出臂 r_B 及入出臂夹角 $2k$ 。图 3 给出了上述各参数存在误差时光谱带宽随波长变化的曲线。可以看出, 入臂和出臂的长度误差对光谱带宽的影响较大而入出臂夹角 $2k$ 的误差对光谱带宽的影响较小。入臂(出臂)的长度减小时所引起的曲线上移大于它增大时所引起的, 且前者的曲线走势与理论曲线走势相同而后者曲线走势与理论曲线走势相反; 但不论 $2k$ 增加还是减小, 其曲线走势均与理论曲线走势相同。

下面考虑对 IV 型凹面全息光栅使用参数误差进行补偿。由于补偿作用是相互的, 所以只需研究以下几种情况: 1) r_A 存在误差, 调节 $2k$ 进行补偿; 2) r_A 存在误差, 调节 r_B 进行补偿; 3) $2k$ 存在误差, 调节 r_B 进行补偿。补偿时, 以待调节的量为变量, 对 (12) 式进行优化即可。补偿后的光谱带宽曲线如

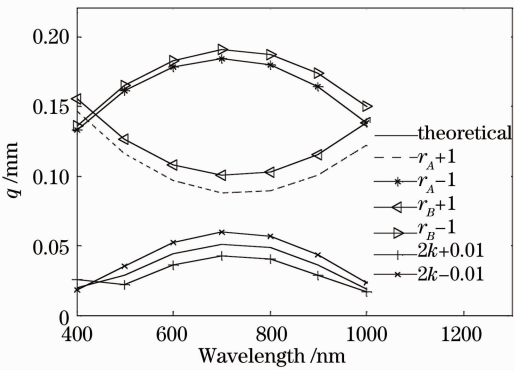


图 3 使用参数的误差对光谱带宽的影响

Fig. 3 Effects of using parameter errors on spectral width

图 4所示,与图 3 对比可以看出:IV型凹面全息光栅一个使用参数在参考平面内的误差可以通过调节参考平面内的其他使用参数进行补偿。值得注意的是,由于光谱带宽对 $2k$ 的误差不敏感,当调节 $2k$ 对其他使用参数的误差进行补偿时,其改变的幅度较大。由图 4 可知:当 r_A 减少 1 时 $2k$ 需调整为 0.366 (约为 19.25°),当 r_A 增加 1 时, $2k$ 需调整为 0.014 (约为 0.802°),这将会使单色仪的结构发生较大改变,所以,如果没有必要,尽量不要调节 $2k$ 对其他参数的误差进行补偿。

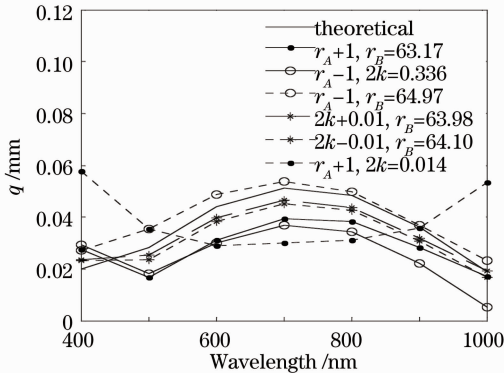


图 4 使用参数之间的相互补偿

Fig. 4 Mutually compensation of the using parameters

3.2 IV型凹面全息光栅记录参数在参考平面内的误差

IV型凹面全息光栅的记录参数为记录点光源 C 到光栅顶点的距离 r_C , CO 与光栅法线的夹角 γ , 记录点光源 D 到光栅顶点的距离 r_D , DO 与光栅法线的夹角 δ 。上述各个参数的误差对光谱带宽的影响如图 5 所示。可以看出: r_C 减小 1 与 δ 减小 0.01 所对应的曲线接近且与理论曲线的偏离较大; r_C 增大 1 与 δ 增大 0.01 所对应的曲线接近且与理论曲线有两处相交;其他参数误差所对应的曲线与理论曲线的偏离较小,说明光谱带宽对这些参数的误差不敏感。

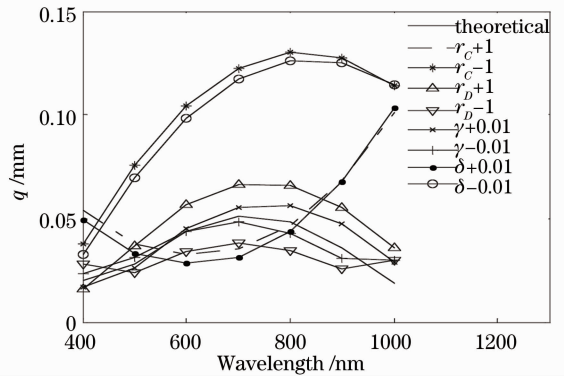


图 5 记录参数的误差对光谱带宽的影响

Fig. 5 Effects of recording parameter errors on spectral width

下面考虑对IV型凹面全息光栅记录参数误差进行补偿。由于补偿作用是相互的,只需对以下几种情况进行研究:1) r_C 存在误差,调节 γ 进行补偿;2) r_C 存在误差,调节 r_D 进行补偿;3) r_C 存在误差,调节 δ 进行补偿;4) γ 存在误差,调节 r_D 进行补偿;5) γ 存在误差,调节 δ 进行补偿;6) r_D 存在误差,调节 δ 进行补偿。由于篇幅的限制,这里只讨论参数误差为正值的情况,以要调节的量为变量对(12)式进行优化即可实现补偿作用。补偿后光谱带宽的曲线如图 6 所示。可以看出,IV型凹面全息光栅一个记录参数在参考平面内的误差可以通过调节其他记录参数进行补偿。

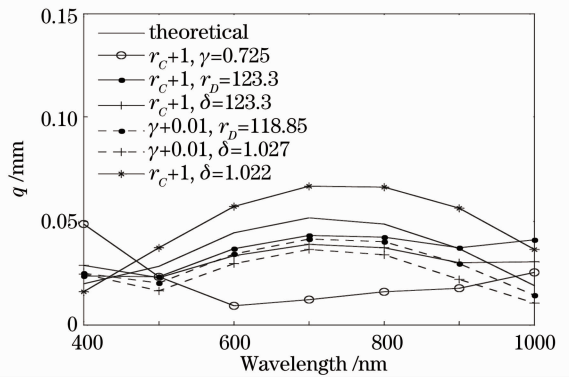


图 6 记录参数之间的相互补偿

Fig. 6 Mutually compensation of the recording parameters

对已经制作完成的IV型凹面全息光栅而言,其记录参数的误差也可以通过调节其使用参数进行补偿。由 3.1 的分析可知,要保持单色仪的结构不发生太大变化,只能调整单色仪的入出臂 r_A 和 r_B 。选以下几组有代表性的情况进行分析讨论:1) $(r_C + 1, \gamma + 0.01, r_D + 1, \delta + 0.01)$; 2) $(r_C + 1, \gamma - 0.01, r_D + 1, \delta + 0.01)$; 3) $(r_C + 1, \gamma - 0.01, r_D - 1, \delta + 0.01)$; 4) $(r_C + 1, \gamma - 0.01, r_D - 1, \delta - 0.01)$;

5) ($r_C - 1, \gamma - 0.01, r_D - 1, \delta - 0.01$)。以 r_A 和 r_B 为变量, 对(12)式进行优化, 每种情况的补偿效果如图7所示。可以看出, 调节 r_A 和 r_B 对情况2)和3)引起的光谱展宽的补偿效果不明显, 这是由于2)和3)中, 两个记录点光源的入射角度反向变化, 使光栅常数发生较大改变, 经计算可知2)和3)中光栅常数变为 $1/530$ mm, 而其他情况中光栅常数仍然为 $1/500$ mm。

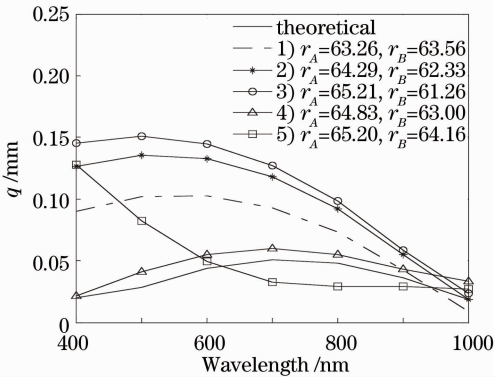


图7 使用参数对记录参数误差的补偿

Fig. 7 Using parameter compensation for recording parameter errors

3.3 IV型凹面全息光栅记录点光源与参考平面的偏离误差

设点光源 C 与参考平面的偏离误差为 z_C , 点光源 D 与参考平面的偏离误差为 z_D , 它们对光谱带宽的影响如图8所示。可以看出, 各点光源幅值相等的正负偏离误差对光谱带宽的影响是相同的, 这是因为整个光学系统是关于参考平面对称的。点光源 C 离光栅顶点较近, 其偏离误差对光谱性能的影响较大。

下面考虑对点光源与参考面的偏离误差进行补偿。由于补偿作用是相互的, 只需考虑以下几种情

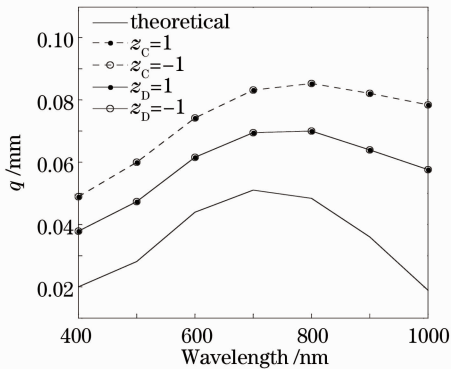


图8 记录点光源与参考平面的偏离对光谱带宽的影响

Fig. 8 Effect of the recording point light sources' departure from the reference plane on spectral width

况: 1) 点光源 C 与参考平面存在偏离误差 z_C , 调节 z_D 进行补偿; 2) 点光源 C 与参考平面存在偏离误差 z_C , 调节 r_C, γ, r_D 和 δ 进行补偿; 3) 点光源 D 与参考平面存在偏离误差 z_D , 调节 r_C, γ, r_D 和 δ 进行补偿; 4) 点光源 C 与参考平面存在偏离误差 z_C , 调节 r_A 和 r_B 进行补偿; 5) 点光源 D 与参考平面存在偏离误差 z_D , 调节 r_A 和 r_B 进行补偿。由于系统是关于参考平面对称的, 只需考察点光源的偏离误差为正值的情况。补偿后的光谱带宽如图9所示。与图8对比可以看出, 情况1)的补偿效果近乎理想, 其他情况的补偿效果不太明显。由此可知, 一个记录点光源与参考平面的偏离误差只能通过调节另一个记录点光源与参考平面的距离进行补偿, 而不能通过调节参考平面内的参数对其进行补偿。这说明, IV型凹面全息光栅参数在参考平面内的误差与参考平面外的误差是不相关的。

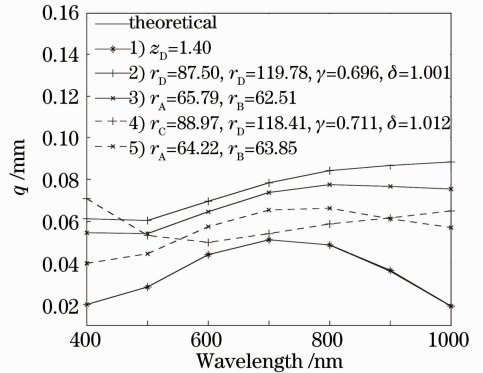


图9 对记录点光源与参考平面的偏离引起的光谱展宽的补偿

Fig. 9 Compensation of the spectral broadening for the recording point light sources' departure from the reference plane

4 结 论

为了简单直观地考察IV型凹面全息光栅各参数误差对光谱性能的影响及各参数误差的相互补偿作用, 由费马原理推导出光栅衍射光像点与理想像点在色散方向和垂直于色散方向的偏移量, 并借鉴光栅均方根法优化函数表达形式建立了新的光栅优化函数——平方和法优化函数。对比验证了该函数的正确性并以该函数为基准分析了IV型凹面全息光栅各参数在参考平面内外的误差对光谱性能的影响及其补偿。结果表明: IV型凹面全息光栅一个使用参数或记录参数在参考平面内的误差可分别通过调节其他使用参数或记录参数进行补偿; 当IV型凹面全

息光栅记录参数在参考平面内的误差不改变光栅常数时,可以通过调节使用参数对其进行补偿;IV型凹面全息光栅一个记录点光源与参考平面的偏离误差只能通过调节另一个记录点光源与参考平面的距离进行补偿。

参 考 文 献

- 1 J. E. Mack, J. R. Stehn, B. Edlén. On the concave grating spectrograph, especially at large angles of incidence [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1932, **22**(5): 245~264
- 2 H. G. Beutler. The theory of the concave grating [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1945, **35**(5): 311~340
- 3 Ling Qing. Modeling and Optimization of Recording Optics for Varied Line Space Holographic Gratings [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2006. 3~5
凌 青. 变间距全息光栅记录光路的建模与优化 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006. 3~5
- 4 H. Noda, T. Namioka, M. Seya. Geometric theory of the grating [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1974, **64**(8): 1031~1036
- 5 M. P. Crisp. Aberration of holographic toroidal grating systems [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(10): 1508~1518
- 6 C. Palmer. Theory of second-generation holographic diffraction gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1989, **6**(8): 1175~1188
- 7 T. Namioka, M. Koike, D. Content. Geometric theory of the ellipsoidal grating [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(31): 7261~7274
- 8 W. R. McKinney, C. Palmer. Numerical design method for aberration-reduced concave grating spectrometers [J]. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(15): 3108~3118
- 9 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
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
- 10 R. Grange. Aberration-reduced holographic spherical gratings for Rowland circle spectrographs [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(19): 3744~3749
- 11 Li Chaoming, Wu Jianhong, Tang Minxue. Design of flat field holographic concave grating [J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(2): 57~58
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
- 12 Y. Harada, H. Noda, M. Koike. Holographic grating recorded using aspheric wavefronts for a Seya-Namioka monochromator [J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(20): 4375~4380
- 13 T. Harada, K. Takahashi, H. Sakuma *et al.*. Optimum design of a grazing-incidence flat-field spectrograph with a spherical varied-line-space grating [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(13): 2743~2748
- 14 Kong Peng, Bayanheshig, Li Wenhao *et al.*. Optimization of Rowland circle mounts for broad band spectrographs [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(4): 0409003
孔 鹏, 巴音贺希格, 李文昊 等. 宽波段全息罗兰光栅的优化 [J]. *中国激光*, 2011, **38**(4): 0409003
- 15 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
- 16 C. Palmer. Diffraction Grating Handbook [M]. New York: Newport Corporation, 2005. 232~233
- 17 M. Koike, K. Ohkubo. Holographic concave gratings for use with an off-plane constant-deviation monochromator [J]. *Appl. Opt.*, 1986, **25**(22): 4071~4075
- 18 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 grating [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(7): 1674~1678
周 倩, 曾理江, 李立峰. 平场全息凹面光栅制作结构和使用结构之间误差补偿作用的数值模拟和实验验证[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, **28**(7): 1674~1678
- 19 M. Koike, T. Namioka. Merit function for the design of grating instruments [J]. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(10): 2048~2056