doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2019.02.013

离面工作条件下光谱仪多光栅槽型 优化设计*

陈力斯^{1,2,3†} 胡中文^{1,2} 姜海娇^{1,2}

(1 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所 南京 210042)
 (2 中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所) 南京 210042)
 (3 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 在大规模多波段成像和无缝光谱巡天中,无缝光谱巡天极限星等在一定程度上受 无缝光谱效率和无缝光谱光栅衍射效率制约,针对无缝光谱仪中布置在焦面附近的光栅 开展衍射效率优化设计研究.在光栅衍射效率的计算中采用严格耦合波分析方法,并在优 化算法中综合采用模式搜索法和差分进化算法相结合的方法,得到了衍射效率高同时满 足工程化要求的最优化槽型.模式搜索法能快速地收敛到局部最优值,差分进化算法具有 全局择优的特点,两者结合提升了运算效率和结果的可靠性.针对无缝光谱仪中工作在不 同波段、不同入射角和不同离面角的多块光栅优化衍射效率.优化结果表明,通过合理控 制槽型,所有光栅在闪耀波长处的理论平均衍射效率均可达到0.83.

关键词 望远镜, 仪器: 光谱仪, 方法: 分析, 方法: 数值 中图分类号: P111; 文献标识码: A

1 引言

空间天文光学观测是天文观测技术的重要发展方向之一.我国在载人航天重大科学 工程项目的支持下,正在开展大规模多波段成像和无缝光谱巡天的研制任务.无缝光谱 巡天依托空间站平台开展从紫外波段到近红外波段低分辨率无缝光谱观测,是空间站光 学巡天任务中的两大功能之一.该巡天任务的开展对研究宇宙的起源与演化、探索紫外 及早期宇宙的研究等有极为重要的科学意义.

无缝光谱巡天极限星等在一定程度上受无缝光谱效率和无缝光谱光栅衍射效率 制约,光栅衍射效率的数值模拟方法可分为标量波理论和矢量波理论两大类.标量衍 射模型缺乏足够的精度.矢量波理论本质上是严格求解麦克斯韦方程,经常采用积分 法与微分法.其中积分法以有限元法^[1]和边界元法^[2]为代表,微分法以严格耦合波分 析(RCWA)方法为主,同时还包括坐标变换法^[3]、有限差分法^[4]、基于快速傅里叶分 解(FFF)的微分算法^[5]等.在光栅衍射效率的优化方面,基于标量衍射理论的研究者采用

²⁰¹⁸⁻¹¹⁻¹⁹收到原稿, 2019-01-22收到修改稿

^{*}国家自然科学基金项目(11873013)和中国科学院先导B项目(XDB23030204)资助

[†]lschen@niaot.ac.cn

的优化设计算法包括各种梯度算法、投影算法、模拟退火算法等.基于矢量波理论的研究者优化算法采用遗传算法、模拟退火法、差分进化算法和梯度下降法等^[6-15].

本文针对我国空间站无缝光谱巡天任务优化衍射光栅的效率,基于RCWA理论,综 合模式搜索法和差分进化算法的基础上,对空间无缝光谱3个波段紫外、可见光和近红 外光栅进行了优化设计.具体的优化过程是首先根据光谱仪zemax文件确定各个光栅工 作的入射角以及离面角,然后依据上述工作条件优化光栅槽型得到最优衍射效率.优化 结果表明,无缝光谱仪中工作在不同波段、不同入射角和不同离面角的多块光栅通过合 理控制槽型,所有光栅在闪耀波长处的理论平均衍射效率可以达到0.83.

2 无缝光谱仪器光栅及光栅衍射效率的仿真

2.1 无缝光谱仪器光栅配置

无缝光谱仪器的核心色散元件是工作在焦面附近的光栅组件,它由工作在不同波段的24块光栅拼接而成.在光学设计中,各块光栅单独优化设计达到系统各项指标,每块光栅工作的入射角、离面角以及工作级次均不相同.前端望远镜系统采用离轴三反结构、主镜口径2 m、焦比F14,24块光栅工作在3个不同波段GI、GU、GV,波长范围覆盖255-1000 nm. 其中GI波段对应波长范围是620-1000 nm,GU波段对应波长范围是255-420 nm,GV波段对应波长范围是400-650 nm,所有的光栅均为透射式平面刻划光栅,光栅尺寸110 nm × 50 nm,工作波段的光栅刻线密度GI为150 g/nm,GV为235 g/nm,GU为333 g/nm.24块光栅在系统中的整体布局如图1所示.



Fig. 1 The layout of grating components

2.2 光栅衍射效率仿真的严格耦合波分析

从电磁学的观点来看,求解光栅问题本质上是解决边界值问题.严格耦合波分析方 法也叫傅立叶模态方法,傅立叶模态方法只是解决这个边界值问题的其中一种方法,它 的简洁性使它成为最常用的衍射光栅建模方法^[16].该方法的特点是将电场和磁场扩展 为Floquet-Fourier系列同时将介质的介电常数用傅里叶级数展开,最终转化为求解麦克 斯韦方程对应的矩阵特征值问题. 首先将包含光栅的3维物理空间分为3个区域: 顶部含 有入射平面波的半无限区域I,入射及反射电磁场在该区域; 中间区域也称为光栅区域或 周期区域G,在该区域介质边界或折射率存在周期性变化; 底部半无限区域II,透射的电 磁场在该区域,如图2所示^[17].入射/反射区域I和透射区域II的折射率分别为 $n_{\rm I}$ 和 $n_{\rm II}$.光 栅的周期为 Λ ,占空比为f,其线高为d,槽宽 $w = f\Lambda$.在光栅区域中建立如图2所示的直角 坐标系,图中 θ 为入射光的入射角,入射波波矢 $k_{\rm I}$ 所在的铅垂面与xoz平面夹角为 ϕ ,电场 矢量E与 $k_{\rm I}$ 所在铅垂面的夹角为 Ψ ,入射光在自由空间中的波长记为 λ_0 .



Fig. 2 Schematic diagram of the conical diffraction

应用RCWA求解光栅问题时,首先将光栅区域的相对介电常数展开成Fourier级数的形式, ε_g 为相对介电常数Fourier展开时的第g级分量.入射场可以用 Ψ 、 θ 、 ϕ 、 n_I 、 λ_0 表示出来.

区域I的电场矢量为入射电场与各级反射波电场的和,区域II的电场矢量为各级透射波电场的和. *i*级反射波的复振幅矢量用**R**_i表示,*i*级透射波的复振幅矢量用**T**_i表示. **R**_i和**T**_i均为待定.表达式中的各个波矢分量由弗洛盖定理求得.

对于光栅区域的电场矢量 E_g 和磁场矢量 H_g ,可用Fourier级数展开为空间谐波的 叠加. 电场矢量 $E_g = \sum_i [S_{x,i}(z)\hat{x} + S_{y,i}(z)\hat{y} + S_{z,i}(z)\hat{z}] \exp\left[-j\left(k_{x,i}x + k_yy\right)\right]$. 磁场矢 量 $H_g = -j\left(\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}\right)^{1/2} \sum_i [U_{x,i}(z)\hat{x} + U_{y,i}(z)\hat{y} + U_{z,i}(z)\hat{z}] \exp\left[-j\left(k_{x,i}x + k_yy\right)\right]$. 其中 \hat{x} 、 \hat{y} 、 \hat{z} 分别为x、y、z方向的单位矢量, ε_0 为真空中的介电常数, μ_0 为真空中的磁导率, j为虚数单位. 根据弗洛盖定理, 第i级波矢在x方向的分量 $k_{x,i} = k_0[n_I \sin\theta \cos\phi - i(\frac{2\pi}{A})]$, 在y方向的分量 $k_y = k_0n_I \sin\theta \sin\phi$, 其中 $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ 为入射光束在真空中的 波数. $S_{x,i}(z)$ 、 $S_{y,i}(z)$ 和 $S_{z,i}(z)$ 分别是i级衍射谐波的电场复振幅矢量 $S_i(z)$ 在x、y、 z方向上的分量. 同理, $U_{x,i}(z)$ 、 $U_{y,i}(z)$ 和 $U_{z,i}(z)$ 分别是第i级衍射谐波磁场复振幅矢 量 $U_i(z)$ 在x、y、z方向上的分量. 记 $S_x = (\cdots, S_{x,-2}, S_{x,-1}, S_{x,0}, S_{x,1}, S_{x,2}, \cdots)$ 和 $\dot{S}_x =$ $\left(\cdots,\frac{\partial S_{x,-2}}{\partial z},\frac{\partial S_{x,-1}}{\partial z},\frac{\partial S_{x,0}}{\partial z},\frac{\partial S_{x,1}}{\partial z},\frac{\partial S_{x,2}}{\partial z},\cdots\right)$.同理,记 $\ddot{\boldsymbol{S}}_x$ 、 $\ddot{\boldsymbol{U}}_x$ 分别为 $\boldsymbol{S}_{x,i}$ 、 $\boldsymbol{U}_{x,i}$ 各个不同级次的x方向分量对z求2阶偏导排列成的矩阵.化简可得到矩阵形式^[17]:

$$\begin{cases} \ddot{\boldsymbol{S}}_{x} = \left(\boldsymbol{K}_{y}^{2} + \boldsymbol{K}_{x}\boldsymbol{H}^{-1}\boldsymbol{K}_{x}\boldsymbol{H} - k_{0}^{2}\boldsymbol{H}\right)\boldsymbol{S}_{x} \\ \ddot{\boldsymbol{U}}_{x} = \left(\boldsymbol{K}_{y}^{2} + \boldsymbol{K}_{x}^{2} - k_{0}^{2}\boldsymbol{H}\right)\boldsymbol{U}_{x} \end{cases},$$
(1)

其中 K_y 为一对角元为常数的N维对角阵,其对角元为波矢分量 k_y ,H为一个N维Toeplitz 矩阵,其矩阵元素为光栅介电系数的各级傅里叶分量. K_x 是依次以 $\frac{k_x,-N}{k_0}$, $\frac{k_x,-N+1}{k_0}$,…, $\frac{k_x,0}{k_0}$,…, $\frac{k_x,N-1}{k_0}$, $\frac{k_x,N}{k_0}$ 为对角元构成的对角矩阵,同理 K_y 是依次以 $k_{y,-N}$, $k_{y,-N+1}$, … $k_{y,0}$,…, $k_{y,N-1}$, $k_{y,N}$ 为对角元构成的对角矩阵.此时,麦克斯韦方程组的求解化 为求解微分方程(1)式,可以求得 S_x 、 U_x 的通解,用求得的 S_x 、 U_x 求 S_y 、 U_y .

到这里, 光栅区域中电场矢量和磁场矢量都已求出, 有一些常数需要通过求解 边界条件求得. 根据入射媒质和光栅的边界z = 0处边界条件方程和光栅和基底的边 界z = d处的边界条件方程以及在入射媒质和基底区域中利用电场矢量与光波矢量的正 交条件^[17]可以求得第*i*级的 R_i 和 T_i .

第*i*级反射光的衍射效率DE_{ri}和第*i*级透射光的衍射效率DE_{ti}为:

$$\begin{cases} DE_{ri} = Re\left(\frac{k_{I,zi}}{k_{I}\cos\theta}\right) \left(\left|R_{ix}\right|^{2} + \left|R_{iy}\right|^{2} + \left|R_{iz}\right|^{2}\right) \\ DE_{ti} = Re\left(\frac{k_{II,zi}}{k_{II}\cos\theta}\right) \left(\left|T_{ix}\right|^{2} + \left|T_{iy}\right|^{2} + \left|T_{iz}\right|^{2}\right) \end{cases},$$
(2)

其中k_I、k_{II}分别为区域I、II的波数, k_{I,zi}和k_{II,zi}的表达式可以统一表示为:

$$k_{l,zi} = \begin{cases} +(k_0^2 n_l^2 - k_{x,i}^2 - k_y^2)^{\frac{1}{2}}, k_{x,i}^2 + k_y^2 \leqslant k_l^2 \\ -\mathbf{j}(-k_0^2 n_l^2 + k_{x,i}^2 + k_y^2)^{\frac{1}{2}}, k_{x,i}^2 + k_y^2 > k_l^2 \end{cases}$$
(3)

其中, l = I, II, 这里l是一个记号. l = I时对应的 n_l 为 n_I , 对应的是入射/反射区域I的折 射率. Re是取实部运算. R_{ix} 、 R_{iy} 和 R_{iz} 分别是 R_i 在x、y、z方向上的分量. 同理, T_{ix} 、 T_{iy} 和 T_{iz} 分别是 T_i 在x、y、z方向上的分量.

对于无缝光谱仪实际的应用,很多时候矩形槽型的光栅不能得到最优衍射效率.非 矩形槽型的光栅衍射效率计算需要采用阶梯近似,将该槽型划分成多层矩形槽型并配合 传输矩阵方法实现,我们用Matlab编写了计算任意槽型光栅衍射效率的程序.

3 无缝光谱仪中光栅衍射效率的优化

对于单光栅,若待优化参数只有1个,直接采用枚举法搜索最优参数时需要接近半小时,搜索时间随最优参数的个数呈指数增长.对于无缝光谱仪中的24块光栅,优化程序运行的时间很长,为了提高运算速度,本文采用模式搜索法和差分进化算法结合的方法进行光栅优化.

3.1 光栅衍射效率优化的模式搜索法和差分进化算法

光栅的优化问题本质上都可以归结为关于待反演参数的某种目标函数的全局极值问题^[18].常用的全局优化方法有遗传算法、模拟退火法、禁忌搜索法等.本文采用模式

搜索法和差分进化算法对光栅槽形进行优化.模式搜索法^[19]是Hooke和Jeeves于1961年 提出的,这种方法的基本思想是通过迭代力图使产生的序列沿"山谷"走,从而接近极小 点.差分进化算法和标准进化算法的计算步骤几乎一样,不同的是差分进化算法首先执 行变异过程:在当前种群中随机选择3个个体,选里面的2个个体构造差分向量加到第3个 个体之上.实现上述变异过程后,执行交叉操作和选择操作,较好的个体进入下一代继 续迭代,直到满足算法的终止条件.模式搜索法能快速地收敛到局部最优值,本文中经 过模式搜索法得到差分进化算法的初始种群.利用差分进化算法全局择优的特点,有效 避免局部最优值,提升了运算效率.该方法相比较于单纯依靠随机方法产生的初始种群 具有更大的适应性.算法流程图如图3所示.



Fig. 3 Flow chart of the optimization algorithm

3.2 无缝光谱仪中光栅衍射效率优化的算法流程

首先,我们要确定光栅的待优化参数并对光栅建模.不同槽型光栅待优化的参数 不同,可以将光栅参数表示成 $p = [p_1, p_2, \dots, p_M]$,*M*是待优化的参数个数.对于矩形 光栅如图4 (a),待优化的参数可以表示为 $P_1 = [\Lambda, d, w]$.对于锯齿型(Sawtooth)光栅如 图4 (b),其顶角为直角,有2个几何参量:光栅周期 Λ ,左底角la,待优化的参数可以表示 为 $P_2 = [\Lambda, la]$.对于三角形光栅如图4 (c),三角形光栅有3个几何参量:光栅周期 Λ 、左 底角la、右底角ra,待优化的参数可以表示为 $P_3 = [\Lambda, la, ra]$.

对于无缝光谱仪中的光栅, 在光学设计中考虑到光谱仪的光谱效率等, 刻线密度已 经确定, 因此对于矩形光栅, 待优化的参数可以表示为 $Q_1 = [d, w]$. 对于三角形光栅, 待 优化的参数可以表示为 $Q_2 = [la, ra]$. 对于锯齿型光栅待优化的参数为la. 光栅基底与光 栅区选取同样的材料: 熔融石英. 对于单块光栅优化时, 假设工作入射角为3.8°, 离面角 为10°, 工作在+1级.

其次,对光栅待优化参数赋初始值并确定目标函数.在我们的程序中初始值是采用Matlab随机函数产生的.对目标函数的选取,我们一方面要求在闪耀波长处衍射效率 尽量大,另一方面,要求在该波段两端的边缘波长的衍射效率能大于0.6.记q为待优化参 数,光栅面形优化的数学模型可以表示为:

60卷

$$\begin{cases} q = \arg \max \operatorname{DE}_{t1}(\lambda_{\mathrm{b}}), q \in (q_{\min}, q_{\max}) \\ \text{s.t. } \operatorname{DE}_{t1}(\lambda_{1}) > 0.6 \& \operatorname{DE}_{t1}(\lambda_{\mathrm{m}}) > 0.6 \end{cases},$$

$$(4)$$

其中 λ_1 、 λ_m 分别为两端的波长, λ_b 为闪耀波长.

然后,调用严格耦合波分析算法和模式搜索法,获得局部最优值.

最后,将得到的局部最优值作为差分进化算法的初始种群,调用严格耦合波分析算 法和差分进化算法,求得最优解.



3.3 光谱仪中多光栅衍射效率的优化

该光谱仪中色散元件部分由24块光栅拼接而成,每块光栅工作的入射角、离面角以 及工作级次均不相同.对于光谱仪中的24块光栅的衍射效率同时进行优化,首先建立光 路中光栅的几何模型,计算各个光栅工作的入射角和离面角.对于不同的光栅,优化光栅 参数,得到最优衍射效率.算法流程如下:(1)根据无缝光谱仪zemax文件,建立空间直角 坐标系,根据光路的几何模型求得每个光栅工作的入射角和离面角;(2)根据待优化参数, 第1步计算出来的光栅工作参数以及采用基于RCWA的衍射效率程序,采用模式搜索法 和差分进化算法结合的方法优化衍射效率.

4 仿真结果

4.1 单光栅衍射效率优化结果以及优化算法验证

对于无缝光谱仪近红外波段的一块光栅,其对应的工作参数为:入射角3.8°、波 长255-420 nm、刻线密度333 g/mm、闪耀波长337.5 nm、未加增透膜,选择锯齿型槽 型光栅,优化左底角获得工作在+1级次上衍射效率.通过优化光栅参数,可以得到:左底 角为12.5°时在保证边缘波长衍射效率均大于0.6的情况下,+1级衍射效率最大.图5是衍 射效率曲线.



Fig. 5 The optimal diffraction efficiency curve for a single grating

图6是通过穷举法得到的衍射效率与左底角的关系,验证了优化程序的正确性.可 以看到尽管在左底角为12.5°时闪耀波长+1级衍射效率不是最大,但是保证了边缘波长 处衍射效率大于0.6,这在工程上具有重要意义.



Fig. 6 The relationship between diffraction efficiency and the left bottom angle obtained by enumeration

分别对光栅的槽型设置为矩形和正弦形最优衍射效率曲线如图7所示.可以看到在 我们应用背景下,矩形槽型和正弦形槽型最大衍射效率小于0.4,锯齿型槽型光栅最优衍 射效率大于0.4.因此在无缝光谱仪光谱仪中,衍射光栅的类型选择锯齿型槽型光栅.





4.2 多光栅衍射效率优化结果

本文对24块光栅槽型同时进行优化,由于不同的光栅工作的入射角、离面角以及光 栅本身刻线密度工作级次均不相同,但是考虑到在工程实际中,工作在同一波段内的光 栅的槽型参数尽量相同,所以需要对所有光栅同时进行优化,获得最优衍射效率.

首先求得光谱仪中每个光栅工作的入射角和离面角,如表1所示.根据上面求得的 每个光栅工作的入射角和离面角,可以对多个光栅同时优化.在进行多光栅优化的过程 中,我们一方面考虑工作波段边缘波长处衍射效率能尽量大,并且同一波段内工作的8块 光栅的槽型参数尽量相同,另一方面需要获得在闪耀波长处最大衍射效率.最优化槽型 参数结果如下:当光栅工作在+1级时,较小的角度对应的直角边作为工作面,当光栅工 作在-1级时,较大的角度对应的直角边作为工作面,优化结果如表2.对于多光栅,GI波 段光栅槽型左右底角分别为15.5°和74.5°,对应的中心波长在各自工作级次上平均 衍射效率可以达到0.83.

| Number | Grating | Incident angle/ $^{\circ}$ | Azimuth angle/ $^{\circ}$ | Order |
|--------|---------|----------------------------|---------------------------|---------|
| 1 | GI1-1 | 4.4050 | 2.5217 | -1 |
| 2 | GI1-2 | 4.7585 | 2.5259 | +1 |
| 3 | GI2-1 | 4.4371 | 2.5302 | -1 |
| 4 | GI2-2 | 4.7277 | 2.5329 | +1 |
| 5 | GI3-1 | 4.5310 | -2.5399 | $^{-1}$ |
| 6 | GI3-2 | 4.6289 | -2.5388 | +1 |
| 7 | GI4-1 | 4.5585 | -2.5385 | -1 |
| 8 | GI4-2 | 4.5974 | -2.5369 | +1 |
| 9 | GU1-1 | 3.4568 | 0 | -1 |
| 10 | GU1-2 | 3.9177 | 0 | +1 |
| 11 | GU2-1 | 3.6780 | 1.2613 | $^{-1}$ |
| 12 | GU2-2 | 4.1181 | 1.2639 | +1 |
| 13 | GU3-1 | 3.8616 | -1.2698 | $^{-1}$ |
| 14 | GU3-2 | 3.9106 | -1.2689 | +1 |
| 15 | GU4-1 | 3.6492 | 0 | $^{-1}$ |
| 16 | GU4-2 | 3.7018 | 0 | +1 |
| 17 | GV1-1 | 4.4390 | -2.5217 | $^{-1}$ |
| 18 | GV1-2 | 4.7323 | -2.5234 | +1 |
| 19 | GV2-1 | 4.1434 | -1.2605 | $^{-1}$ |
| 20 | GV2-2 | 4.4698 | -1.2639 | +1 |
| 21 | GV3-1 | 2.9524 | 1.2698 | $^{-1}$ |
| 22 | GV3-2 | 4.1609 | 1.2689 | +1 |
| 23 | GV4-1 | 4.4160 | 2.5385 | -1 |
| 24 | GV4-2 | 4.4365 | 2.5369 | +1 |

表 1 光谱仪中不同光栅的入射角和离面角 Table 1 The incident and azimuth angles of different gratings in the spectrometer

| Number | Grating | Order | Diffraction efficiency |
|--------|---------|-------|------------------------|
| 1 | GI1-1 | -1 | 0.8489 |
| 2 | GI1-2 | +1 | 0.8543 |
| 3 | GI2-1 | -1 | 0.8076 |
| 4 | GI2-2 | +1 | 0.8548 |
| 5 | GI3-1 | -1 | 0.8379 |
| 6 | GI3-2 | +1 | 0.8059 |
| 7 | GI4-1 | -1 | 0.8167 |
| 8 | GI4-2 | +1 | 0.8328 |
| 9 | GU1-1 | -1 | 0.8575 |
| 10 | GU1-2 | +1 | 0.8579 |
| 11 | GU2-1 | -1 | 0.8095 |
| 12 | GU2-2 | +1 | 0.8582 |
| 13 | GU3-1 | -1 | 0.8574 |
| 14 | GU3-2 | +1 | 0.8291 |
| 15 | GU4-1 | -1 | 0.8021 |
| 16 | GU4-2 | +1 | 0.8085 |
| 17 | GV1-1 | -1 | 0.8253 |
| 18 | GV1-2 | +1 | 0.8549 |
| 19 | GV2-1 | -1 | 0.8475 |
| 20 | GV2-2 | +1 | 0.8576 |
| 21 | GV3-1 | -1 | 0.8393 |
| 22 | GV3-2 | +1 | 0.8021 |
| 23 | GV4-1 | -1 | 0.848 |
| 24 | GV4-2 | +1 | 0.8022 |

表 2 光谱仪中不同光栅最终衍射效率 Table 2 The final diffraction efficiency of different gratings in the spectrometer

5 结论

本文基于严格耦合波分析,采用模式搜索法和差分进化算法结合的优化算法对光栅 槽形进行优化,得到了衍射效率高且满足工程需要的光栅槽形,达到了预期的目的,满足 了光谱仪研制的需要.模式搜索法和差分进化算法结合的优化方法通过模式搜索法得到 初始种群,利用差分进化算法全局择优的特点,有效避免局部最优值,提升了运算效率, 对其他研究中实际光栅的优化制作有一定的指导作用.

_

参考文献

- [1] Lichtenberg B, Gallagher N C. OptEn, 1994, 33: 3518
- $\left[2\right]$ Kagami S, Fukai I. ITMTT, 1984, 32: 455
- [3] Popov E, Nevière M. Light Propagation in Periodic Media. New York: Dekker, 2003: 23
- [4] Rumpf R C. Design and Optimization of Namo-optical Elements by Coupling Fabrication to Optical Behavior. Orlando: University of Central Florida, 2006: 60
- [5] Popov E, Nevière M. JOSAA, 2001, 18: 2886
- [6] 樊叔维,周庆华,李红.光学学报,2010,30:3134
- [7] 王强, 沈国土, 杨宝成, 等. 红外与激光工程, 2005, 34: 410
- $[8]\$ Chen J S, Lin P D, Chiu F C, et al. OptL, 2012, 37: 3399
- [9] Nghia N H, Chen Y B, Lo Y L. OExpr, 2012, 20: 5882
- [10] Chen Y B, Tan K H. IJHMT, 2010, 53: 5542
- [11] Lin A, Phillips J. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2008, 92: 1689
- [12] Hajimirza S, El Hitti G, Heltzel A, et al. International Journal of Thermal Sciences, 2012, 62: 93
- [13] Rammohan R R, Farfan B G, Su M F, et al. EnOp, 2010, 42: 791
- [14] Johnson E G, Abushagur M A G. JOSAA, 1995, 12: 1152
- [15] Kallioniemi I, Ammer T, Rossi M. OptCo, 2000, 177: 15
- [16] Li L f. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2001: 111
- [17] 邓浩. 周期结构的衍射模拟算法及其应用研究. 成都: 电子科技大学, 2015
- [18] 谈和平, 刘林华, 易红亮, 等. 科学通报, 2009, 18: 2627
- [19] 陈宝林. 最优化理论与算法. 北京: 清华大学出版社, 2005: 332

Optimization on the Groove Profile of Off-plane Gratings in a Multi-grating Spectrometer

CHEN Li-si^{1,2,3} HU Zhong-wen^{1,2} JIANG Hai-jiao^{1,2}

(1 National Astronomical Observatories/Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042)

(2 CAS Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing 210042)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

ABSTRACT To some extent, the slitless spectral survey star and the survey depth are determined by the slitless spectral efficiency and the diffraction efficiency of the grating. In this paper, the diffraction efficiency optimization design is carried out for the grating arranged on the focal plane in the slitless spectrometer. The grating diffraction efficiency can be calculated by the rigorous coupled wave analysis method. The combination of the pattern search method and the differential evolution algorithm is used to optimize the diffraction efficiency. The optimal groove type with high diffraction efficiency and meeting the engineering requirements can quickly converge to the local optimum value. The differential evolution algorithm has the characteristics of global optimization and improves the computational efficiency. For multiple gratings, the diffraction efficiency is optimized according to the different operating conditions of different gratings. The optimization results show that the average diffraction efficiency of sawtooth type grating can reach 0.83.

Key words telescopes, instrumentation: spectrometer, methods: analytical, methods: numerical