

非平行光束光栅照明 C-T 成像光谱仪消像散研究与设计

郝爱花^{1,2,3}, 胡炳樑¹

- (1. 中国科学院西安光学精密机械研究所 光谱成像技术实验室, 陕西 西安 710119;
2. 西安邮电大学 电子工程学院, 陕西 西安 710121;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 切尔尼-特纳(Czerny-Turner, C-T)光谱仪是光栅光谱仪中常用的光谱仪器。其结构紧凑, 无非球面镜, 常被用于单色仪和光谱辐射计中。对于成像光谱仪, 像散是影响其空间分辨和光能利用的主要像差。就非平行光束光栅照明像散校正方法进行了理论分析和实验验证, 提出会聚和发散光栅照明 C-T 成像光谱仪都可以进行像散校正, 其根本取决于光栅入射角和衍射的余弦平方比大于或小于 1, 大于 1 对应发散照明消像散, 小于 1 则对应会聚照明消像散。

关键词: 会聚照明; C-T 成像光谱仪; 像散

中图分类号: N34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)07-2132-05

Research and design of astigmatism-free for C-T imaging spectrometer under non-parallel grating illumination

Hao Aihua^{1,2,3}, Hu Bingliang¹

- (1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. School of Electronic Engineering, Xi'an University of Post and Telecommunications, Xi'an 710121, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Czerny-Turner (C-T) spectrometer usually been used monochromators and spectral radiometers due to its compact structure and spherical mirrors. However, astigmatism greatly confines C-T spectrometer used in imaging spectrometers. Astigmatism-free methods were analyzed theoretically and verified experimentally under non-parallel grating illumination. As a result, astigmatism of C-T spectrometer can be corrected under convergent or divergent grating illumination. When the cosine square ratio of grating incidence to difference angle was more than 1, divergent illumination can correct astigmatism. Conversely, when it was less than 1, convergent illumination can correct astigmatism.

Key words: convergent illumination; C-T imaging spectrometer; astigmatism

收稿日期: 2014-11-07; 修订日期: 2014-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(11327303); 中国科学院空间科学先导专项(XDA04075600)

作者简介: 郝爱花(1977-), 女, 副教授, 博士生, 主要从事光谱仪设计、信息光学和光电信息处理方面的研究。

Email: haoaihua200177@163.com

导师简介: 胡炳樑(1973-), 男, 研究员, 博士, 主要从事光谱成像技术和高速信号处理的研究。Email: hbl@opt.ac.cn

0 引言

由于紫外波段材料选择的局限性,反射式光栅光谱仪是该波段的首选结构,C-T 平面光栅光谱仪是由于克服了 Ebert-Fastie 光栅光谱仪不能消除二次衍射的缺陷,以对称结构、无非球面镜、结构紧凑等广泛应用在单色仪和光谱辐射计等光谱仪器中,但由于离轴球面镜的子午和弧矢焦距不同,使得传统 C-T 光栅光谱仪的像散较为严重,限制了它在成像光谱仪中的应用。为了扩展其在成像光谱仪中的应用,近年来许多文献提出了校正 C-T 光谱仪像散的方法,如在成像镜后加入柱面镜消像散^[1-3]、采用超环面消像散^[4]、自由形式曲面消像散^[5]等,其中研究最热的为发散照明光栅消像散方法^[6-7],区别于前几种方法,发散照明光栅消像散没有引入任何辅助光学元件和非球面镜,仅仅依赖于发散照明条件下光栅的像散补偿作用来校正像散,结构简单,成本低廉,有明显优势。然而前期的研究工作^[8]表明,会聚照明光栅条件下也能够成功校正像散,该文对发散和会聚照明条件下像散校正的内在联系与区别进行了系统研究,此前尚未见相关文献报道,其结论能够给光谱仪设计工作者的结构选取和优化设计提供非常有价值的参考。

1 非平行光束光栅照明消像散原理

1.1 成像过程系统分析

C-T 成像光谱仪的光路图如图 1 所示,图中 S 为入射狭缝,M1 为准直球面镜, θ_C 为准直镜的离轴角, R_C 为准直镜半径,M2 为成像镜, θ_F 为成像镜离轴角, R_F 为成像镜半径,G 为光栅, α_g 为光栅入射角, β_g 为光栅衍射角,D 为探测器, θ_D 为探测器偏转角, L_{SC} 为狭缝到准直镜的距离, L_{CG} 为准直镜到光栅的距离, L_{GF} 为光栅到成像镜的距离, L_{FD} 为成像镜到探测器的距离。

C-T 成像光谱仪的成像过程可以分为三步。

首先,准直透镜生成入射狭缝离散的弧矢像 S1 和子午像 T1,准直球面镜的成像公式为:

$$v_{s1,t1}^{-1} + u^{-1} = f_{cs,ct}^{-1} \quad (1)$$

式中: v_{s1} 和 v_{t1} 为弧矢像 S1 和子午像 T1 的像距; $u = -L_{SC}$,物距, $f_{cs} = R_C / (2\cos\theta_C)$, $f_{ct} = (R_C \cos\theta_C) / 2$,分别为弧矢和子午焦长。

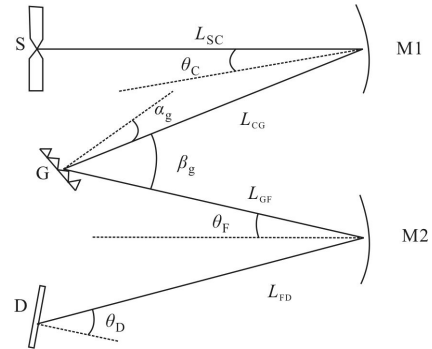


图 1 C-T 光谱仪光路图

Fig.1 C-T spectrometer layout

其次,光栅生成相应于 S1 和 T1 的弧矢像 S2 和子午像 T2,反射光栅的成像公式为:

$$\begin{cases} v_{s2} = -(\cos^2 \beta_g / \cos^2 \alpha_g) u_{s2} \\ v_{t2} = -u_{t2} \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_{s2} 和 u_{t2} 是 S1 和 T1 相对于光栅的物距; v_{s2} 和 v_{t2} 是 S2 和 T2 的像距。

最后,成像镜生成 S2 和 T2 相应的子午像 S3 和弧矢像 T3。成像球面镜的成像公式同准直球面镜,弧矢和子午焦长分别表示为 $f_{fs} = R_F / (2\cos\theta_F)$, $f_{ft} = (R_F \cos\theta_F) / 2$ 。S2 和 T2 到成像镜的物距用 u_{s3} 和 u_{t3} 表示,子午像 S3 和弧矢像 T3 的像距用 v_{s3} 和 v_{t3} 表示。

表 1 给出了发散和会聚光栅照明条件下 C-T 成像光谱仪的对比成像过程。所谓发散照明,是指入射狭缝上一点发出的发散球面波经准直透镜变换后照明光栅的仍然为发散球面波,其必要条件为 $f_{cs} < f_{ct} < u < 0$ 。相反,会聚照明指的是入射狭缝上一点发出的发散球面波经准直透镜变换后变为会聚球面波照明光栅,其必要条件为 $u < f_{cs} < f_{ct} < 0$ 。从表中可以看出,准直镜和成像镜具有相同的像散效应,而衍射光栅产生的像散可以在一定条件下补偿准直镜和成像镜产生的像散。 $\cos^2 \beta_g / \cos^2 \alpha_g < 1$,发散照明光栅可以补偿像散;相反, $\cos^2 \beta_g / \cos^2 \alpha_g > 1$,会聚照明可以补偿像散。

表 1 非平行光束光栅照明下成像过程系统分析

Tab.1 Systematic analysis of imaging process under non-parallel illumination

Imaging process	Divergent illumination ($f_s < f_a < u < 0$)	Convergent illumination ($u < f_s < f_a < 0$)	
Collimating mirror imaging	$v_{i1} > v_{s1} > 0$	$v_{s1} < v_{i1} < 0$	
	Virtue images S1, T1	Real images S1, T1	
	S1 is closer to detector	T1 is closer to detector	
Grating imaging	Assuming $u_{i2} = u_{s2} > 0$	Assuming $u_{i2} = u_{s2} < 0$	
	Virtue images S2, T2	Real images S2, T2	
	$\cos^2 \alpha_g / \cos^2 \beta_g > 1$	$v_{i2} < v_{s2} < 0$	$v_{s2} > v_{i2} > 0$
	T2 is closer to detector	T2 is closer to detector	
	$\cos^2 \alpha_g / \cos^2 \beta_g < 1$	$v_{i2} < v_{s2} < 0$	$v_{s2} > v_{i2} > 0$
	S2 is closer to detector	S2 is closer to detector	
Imaging mirror imaging	Assuming $u_{i3} = u_{s3} < f_{i3} < 0$	Assuming $u_{i3} = u_{s3} > 0$	
	Real images S3, T3	Real images S3, T3	
	$v_{i3} < v_{s3} < 0$	$v_{s3} < v_{i3} < 0$	
	S3 is closer to detector	S3 is closer to detector	

1.2 像散校正条件

类似于发散照明像散校正公式的推导^[7], 会聚照明条件下, 应用前面提到的成像公式, 入射狭缝经准直镜、平面光栅、成像镜依次成像, 可以得到与参考文献[7]相同的零阶像散校正条件, 及中心波长处的像散校正条件。

$$L_{SC} = \frac{0.5R_C R_F \left(\frac{\cos^2 \alpha_g}{\cos^2 \beta_g} - 1 \right)}{R_C (\sec \theta_F - \cos \theta_F) + R_F \left(\frac{\cos^2 \alpha_g}{\cos^2 \beta_g} \sec \theta_C - \cos \theta_C \right)} \quad (3)$$

图 2 给出了光栅衍射角、入射角关系曲线(见图(a)), $\cos^2 \alpha_g / \cos^2 \beta_g$ 、入射角关系曲线(见图(b)), 以及狭缝到准直镜距离 L_{SC} 与 $\cos^2 \alpha_g / \cos^2 \beta_g$ 的关系曲线(见图(c))。模拟过程中光栅频率取 1200 lp/mm, $R_C, R_F, \theta_C, \theta_F$ 和 α_g 分别取 52mm, 53.18mm, $-4.2^\circ, -3.94^\circ$ 和 15.5° 。从图 2(c)可以看出, 当 $\cos^2 \alpha_g / \cos^2 \beta_g < 1$ 时, 光栅到准直镜的距离 $L_{SC} > 30$ mm, 为会聚照明方式; 当 $\cos^2 \alpha_g / \cos^2 \beta_g > 1, L_{SC} < 22$ mm, 为发散照明方式。模拟结果与前面的分析结果一致。所以, 无论发散照明, 还是会聚照明方式, C-T 成像光谱仪零阶像散都可以校正。

参考文献[7]中与色散有关的一阶像散校正可以通过优化 θ_d 和 L_{GF} 实现。

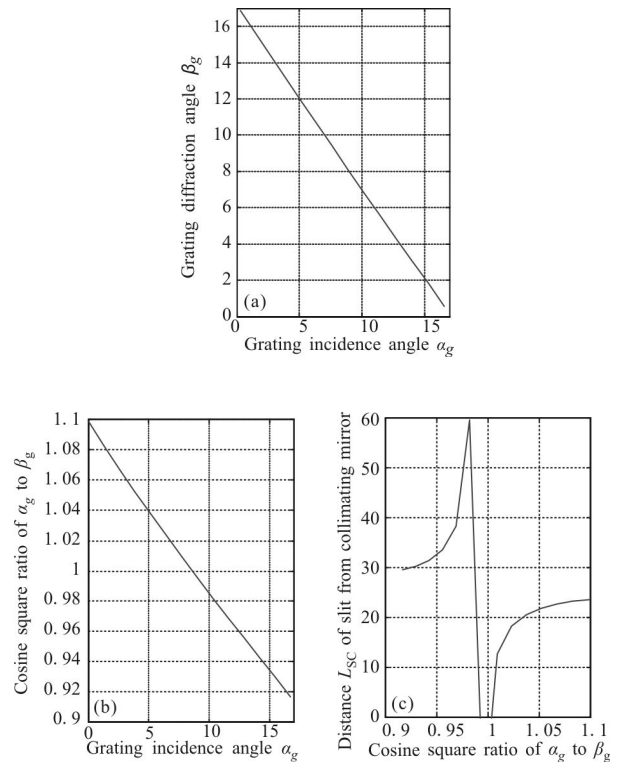


图 2 消像散校正曲线模拟

Fig.2 Simulation curve of astigmatism-free analysis

2 非平行照明像散校正 C-T 光谱仪设计

2.1 技术指标及设计过程

光谱仪的光谱范围为 0.2~0.31 μm, 设计中心波长取 0.25 μm, 平均光谱分辨要求 δλ=0.5 nm, 光栅频率取 1 200 lp/mm。光谱仪的物方数值孔径为 0.062 5, 狭缝尺寸为 2.8 mm×0.016 mm, CCD 像素尺寸为 16 μm×16 μm。设计过程如下:

先选取准直镜的离轴角 θ_C, 光栅入射角 α_g, 以及光栅衍射级次 m=1。根据光谱仪线色散率公式(4)可以确定成像镜的曲率半径 R_F。

$$dI/d\lambda = mf_2/d \cos\beta_g \quad (4)$$

令 R_F cos θ_F = R_C cos θ_C 和彗差校正 Shafer 方程^[9-10]可以确定成像镜的离轴角 θ_F 和准直镜的曲率半径 R_C。Shafer 方程如公式(5)所示:

$$\left(\frac{\cos\alpha_g}{\cos\beta_g}\right)^3 \frac{\sin\theta_C/\cos^3\theta_C}{\sin\theta_F/\cos^3\theta_F} = \frac{R_C^2}{R_F^2} \quad (5)$$

L_{SC} 可以通过零阶像散校正条件公式(3)确定, L_{FD} 通过软件调焦确定, L_{CG} 根据结构合理选取, L_{GF} 和 θ_b 则可以通过设计软件优化一阶消像散得到。至此, 所有的光学参数都已确定。

2.2 设计结果

发散和会聚照明 C-T 成像光谱仪的初始计算参数如表 2 所示, 优化后的系统参数如表 3 所示。表 3 中会聚照明方式下, α_g 和 θ_F 的实际设计值相比较理论计算值有较大偏离, 是实际设计中为避免光路遮挡进行的优化设计。发散和会聚照明的光路图如图 3

表 2 成像光谱仪初始计算参数

Tab.2 Imaging spectrometer initial parameters

Parameter	Divergent illumination	Convergent illumination
θ _C /°	-5	-4.2
θ _F /°	-4.956	-3.94
R _C /mm	52	52
R _F /mm	48.68	53.18
α _g /°	-1	15.5

和图 4 所示, 相应的光学传函曲线如图 4 和图 5 所示。为了简化传函曲线, 图中仅给出了狭缝中心, 波长 0.2 μm, 0.25 μm 和 0.31 μm 的子午和弧矢传函曲线。发散和会聚照明方式下, 在奈奎斯特频率范围内传函值都达到了 0.7 以上, 表明这两种照明方式都能够很好地校正像散。

表 3 成像光谱仪实际设计参数

Tab.3 Imaging spectrometer designed parameters

Parameter	Divergent illumination	Convergent illumination
θ _C /°	-5	-4.2
θ _F /°	-5.54	-7.46
R _C /mm	52	52
R _F /mm	47.57	53.176
α _g /°	-0.05	17.4
L _{SC} /mm	19.15	31
L _{CG} /mm	21.3	46
L _{GF} /mm	22.26	27.2
L _{FD} /mm	32.9	23.67
θ _b /°	9.65	6.8

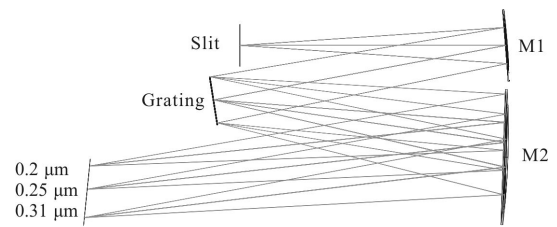


图 3 发散照明光路图

Fig.3 Optimized divergent illumination layout

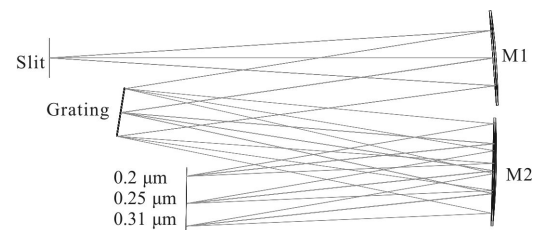


图 4 会聚照明光路图

Fig.4 Optimized convergent illumination layout

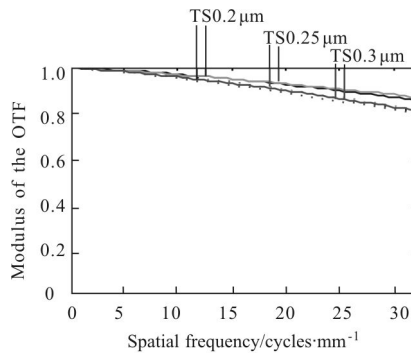


图 5 发散照明条件下的光学传递函数

Fig.5 Divergent illumination MTF for 0.2 μm, 0.25 μm and 0.31 μm

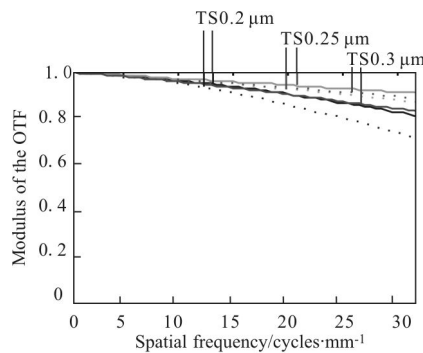


图 6 会聚照明条件下的光学传递函数

Fig.6 Convergent illumination MTF for 0.2 μm, 0.25 μm and 0.31 μm

3 结束语

理论分析和实际设计结果表明 C-T 成像光谱仪的像散在发散和会聚照明方式下都可以得到很好的校正, 光学设计工作者可以根据实际需要进行结构选取, 需要注意的是, 发散照明消像散的必要条件为 $\cos^2\alpha_g / \cos^2\beta_g > 1$; 会聚照明消像散的必要条件为 $\cos^2\alpha_g / \cos^2\beta_g < 1$ 。这一结论为实际设计提供了很有价值的参考。

参考文献:

- [1] Lee K S, Thompson K P, Rolland J P. Broadband astigmatism-corrected Czerny-Turner spectrometer [J]. *Opt Express*, 2010, 18(22): 23378-23384.
- [2] Xue Qingsheng. Czerny-Turner imaging spectrometer for

broadband spectral simultaneity[J]. *Appl Opt*, 2011, 50(10): 1338-1344.

- [3] Guo Xia, Qu Bixiang, Peng Liu. Astigmatism-corrected miniature Czerny-Turner spectrometer with freeform cylindrical lens[J]. *Chin Opt Lett*, 2012, 10(8): 081201-1-081201-4.
- [4] Xue Qingsheng, Wang Shurong, Fengqin Lu. Aberration-corrected Czerny-Turner imaging spectrometer with a wide spectral region[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(1): 11-16.
- [5] Li Xu, Chen Kexin, He Qingsheng, et al. Design of freeform mirrors in Czerny-Turner spectrometers to suppress astigmatism [J]. *Appl Opt*, 2009, 48(15): 2871-2879.
- [6] Bates B, McDowell M, Newton A C. Correction of astigmatism in a Czerny-Turner spectrograph using a plane grating in divergent illumination[J]. *J Phys E: Sci Instrum*, 1970, 3: 206-210.
- [7] Dane R Austin, Tobias Witting, Ian A Walmsley. Broadband astigmatism-free Czerny-Turner imaging spectrometer using spherical mirrors[J]. *Appl Opt*, 2009, 48(19): 3846-3853.
- [8] Hao Aihua, Hu Bingliang, Li Libo, et al. Design of airborne dual channel Ultraviolet-Visible imaging spectrometer with large field of view, wide spectrum, and high resolution [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(12): 3432-3436. (in Chinese)
- 郝爱花, 胡炳樑, 李立波, 等. 大视场宽谱段高分辨率分波段机载紫外-可见光成像光谱仪设计 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(12): 3432-3436.
- [9] Arthur B Shafer, Lawrence R Megill, Leann Droppleman. Optimization of the Czerny-Turner Spectrometer [J]. *J Opt Soc Am*, 1964, 54(7): 879-887.
- [10] Reader J. Optimizing Czerny-Turner spectrographs: a comparison between analytic theory and ray tracing[J]. *J Opt Soc Am*, 1969, 59(9): 1189-1196.
- [11] Chen Tanxuan, Yang Huaidong, Chen Kexin, et al. Coma and resolution in wide spectral region Czerny Turner spectrometer [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(12): 1692-1696. (in Chinese)
- 陈谭轩, 杨怀栋, 陈科新, 等. 宽光谱 Czerny-Turner 光谱仪中的彗差与分辨率 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(12): 1692-1696.