

近红外宽波段下的 Czerny-Turner 结构复合方法 消像散设计

李欣航^{1,2} 董科研² 安岩²

¹长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

²长春理工大学空间光电技术研究所, 吉林 长春 130022

摘要 针对 Czerny-Turner 结构光谱仪宽波段像散很难同时校正的不足, 提出了一种复合方法校正像散, 即在一阶消像散方法校正宽波段像散的能力达到极限时, 加入柱镜, 利用柱镜的相反像散变化趋势, 进一步补偿光学系统的剩余像散, 推导出复合方法的边缘波段像散补偿公式。应用复合方法, 设计了 1 个近红外 900~1700 nm 的消像散 Czerny-Turner 结构。Zemax 的仿真结果表明, 全波段全视场均方根(RMS)值均小于 14 μm , 调制传递函数(MTF)达到 0.7 以上, 全波段的光谱分辨率为 1.5 nm。保证了在高光谱分辨率的情况下, 实现了近红外 800 nm 宽波段像散的同时校正, 避免了能量的横向扩散。该设计方法同样适用其他波段的结构设计, 对宽波段消像散型光学系统的设计具有指导意义。

关键词 光学设计; 消像散型 Czerny-Turner 结构; 像散校正; 柱镜; 复合方法

中图分类号 O433.1; TH744 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1022001

Anastigmatic Design with Czerny-Turner Structure Composite Method on Near-Infrared Broadband

Li Xinhang^{1,2} Dong Keyan² An Yan²

¹*Opto-Electronics Engineer Institute, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

²*Institute of Space Photoelectric Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China*

Abstract A composite method is proposed to correct the astigmatism, which aims at the problem that the astigmatism of the wide band of the Czerny-Turner structure spectrometer is hard to correct at the same time. With the new approach, when the ability of the first-order astigmatism correction reaches the limitation on wide broadband wavelength, the astigmatism opposite trend of added cylindrical lens is used to further compensate the residual astigmatism in the optical system. The astigmatism compensation formula on marginal waveband of with composite method is deduced. With the composite method, an anastigmatic Czerny-Turner structure on near-infrared waveband ranging from 900 nm to 1700 nm is designed. The simulation results of Zemax show that the root-mean-square (RMS) value of full-band and full fields of view is less than 14 μm , modulation transmission function (MTF) is higher than 0.7, and the spectral resolution is 1.5 nm at all wavelengths. The composite method achieves simultaneous correction of astigmatism at near-infrared 800 nm wide waveband, which can avoid energy transverse spread. The method can be applied in structure design at other wavelengths, and it is meaningful for designing broadband anastigmatic optical systems.

Key words optical design; anastigmatic Czerny-Turner structure; astigmatism correction; cylindrical lens;

收稿日期: 2016-04-22; **收到修改稿日期:** 2016-05-19

基金项目: 长春市科技局科技支撑项目(14DR003)

作者简介: 李欣航(1991—), 女, 硕士研究生, 主要从事光学系统设计、光谱仪设计等方面的研究。

E-mail: 317554403@qq.com

导师简介: 董科研(1980—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光学系统设计、光谱仪器设计和激光通信等方面的研究。E-mail: dongkeyan@163.com(通信联系人)

composite method

OCIS codes 220.1000;120.4570; 300.6190

1 引 言

Czerny-Turner (C-T)结构型光谱仪是采用平面光栅作为分光元件的光学仪器,能够获取物质的光谱信息,为后续物质检测识别工作提供依据。C-T结构由狭缝、准直球面反射镜、光栅、聚焦球面反射镜和探测器组成。其具有结构简单、加工检测方法成熟、分辨能力高、调整自由度多、能有效避免二次和多次衍射、色散均匀等优点,因此得到广泛的应用^[1-4]。

C-T结构是离轴反射式的光学系统,光束照射在光学元件上,会导致子午像点与弧矢像点分开,产生像散。针对像散产生的原理,国内外学者提出了一系列C-T结构像散校正的方法。1970年,Bates B等^[5]提出零阶消像散条件,有效消除中心波长的像散;2002年,Masayuki F等^[6]利用超环面聚焦镜设计出光谱覆盖范围为540~560 nm的原理样机;2009年,清华大学徐立等^[7]应用自由曲面理论校正了200~800 nm波段C-T结构的像散;同年,Austin D R等^[8]提出一阶消像散条件,校正了120 nm宽波段的像散;随后,薛庆生等^[9]以不同方法验证了一阶消像散条件的正确性,不应出现数字或字母,不符合逻辑。一阶消像散条件的正确性;2010年,Lee K S等^[10]利用柱镜有效地抑制了400 nm宽波段的像散;2011年,薛庆生等^[11]将楔形柱镜放置在探测器与聚焦球面反射镜之间,校正了光谱范围为300~700 nm的像散;2012年Qu B X等^[12]在交叉型C-T结构中引入自由曲面柱镜,校正了500 nm宽波段像散;2012年,刘健鹏等^[13]利用柱面反射镜设计出远紫外成像光谱仪样机。上述研究均是采用单一方法校正宽波段的像散,波段校正宽度有限。设计宽波段光谱系统,使不同波长的光线分开,实现分光谱成像,不存在色差问题。但随着设计波段范围的增加,像散带来了严重的横向能量扩散,宽波段下边缘波长像散成为系统不能容忍的像差,需要进一步深入研究。

区别于目前已有的研究,本文提出了一种复合型的宽波段校正像散方法,即将光栅自身像散补偿方法和柱镜补偿方法相结合,实现更宽波段像散的校正。由此,推导出了一阶消像散条件下的柱镜补偿公式,实现校正波长的宽度达800 nm。通过矢量和公式,准确得出不同波长下的聚焦镜入射角度和柱镜位置,进而可以计算出光学系统校正后的剩余像散,并利用该值作为校正效果的评价依据。完成了一个宽波段近红外消像散C-T结构的设计实例,对设计结果进行了分析与评价,验证了该方法的可行性,体现了其优越性。

2 复合方法消像散分析

不同于平行光路加入柱镜,提出发散光路加入柱镜的复合方法具有拓宽波段校正宽度的优势。发散光路中的像散较平行光路中的像散已经得到了一定的校正,但由于一阶消像散条件的局限性,像散校正能力有限,需要引入柱镜的相反像散变化趋势弥补一阶消像散条件的不足。

2.1 一阶消像散条件的宽波段局限性

一阶消像散条件能够校正临近中心波长一定波段的像散。Austin D R等^[8]给出了弧矢焦距 S_s 和子午焦距 S_t 分别随衍射角 θ 的变化关系可以表示为:

$$\frac{dS_s}{d\theta} = \frac{\partial S_s}{\partial \alpha_2} \frac{d\alpha_2}{d\theta}, \quad (1)$$

$$\frac{dS_t}{d\theta} = \frac{\partial S_t}{\partial \theta} + \frac{\partial S_t}{\partial \alpha_2} \frac{d\alpha_2}{d\theta}, \quad (2)$$

式中, α_2 为聚焦镜离轴角。

由于中心波长和边缘波长的聚焦镜入射角和衍射角存在一定的近似,即 $\alpha'_2(\lambda) = \alpha_2, \theta'(\lambda) = \theta$,导致由(1)式和(2)式中微分近似推导出的 $\frac{d\alpha_2}{d\theta} = 1 - \frac{L_{gf}}{R_2 \cos \alpha_2}$ 同样存在近似。在波段校正宽度有限时,该近似成立,一阶消像散条件可以实现全波段像散的同时校正;在波段校正宽度增加时,宽波段C-T结构的衍射角跨度范围增大,不同波长的聚焦镜入射角不能忽略。以近红外900~1700 nm波段为例,不同波长下聚焦镜入射角 $\alpha'_2(\lambda)$ 下的 $\frac{dS_s}{d\theta}$ 和 $\frac{dS_t}{d\theta}$ 全波段变化情况如图1所示,临近中心波长的1200~1400 nm波段范围的 $\frac{dS_s}{d\theta} \approx$

$\frac{dS_t}{d\theta}$, 随着波段的加宽, $\frac{dS_s}{d\theta}$ 与 $\frac{dS_t}{d\theta}$ 的差异越来越大, 一阶消像散条件校正能力越来越弱。

图 2 所示的是弧矢像距 S_s 与子午像距 S_t 随波长的变化关系, 可以看出, 与中心波长相邻波段的像散得到了很好的抑制。在 900~1300 nm 短波波段范围内, $S_s > S_t$; 在 1300~1700 nm 长波波段范围内, $S_s < S_t$ 。该一阶消像散条件下, 光学系统的剩余像散 $S_{\text{remain}} = S_t - S_s$, 其变化趋势可作为柱镜补偿像散的依据。

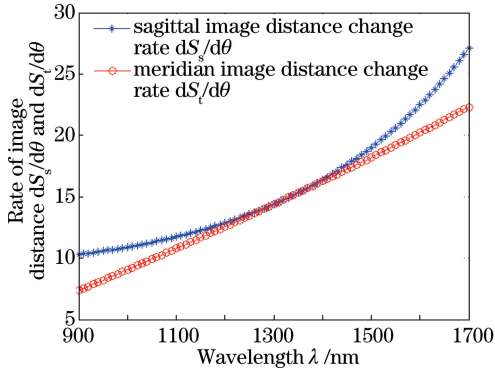


图 1 像面距离变化率随波长的关系

Fig. 1 Change rate of image distance with wavelength

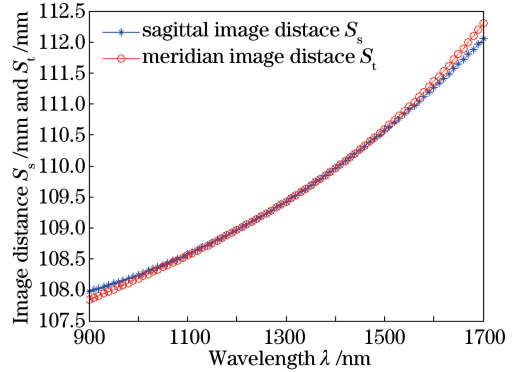


图 2 像距随波长的关系

Fig. 2 Image distance with wavelength

2.2 柱镜补偿剩余像散

柱镜具有改变一维光焦度的特征, 如图 3 所示, 在子午面内相当于平行平板, 在弧矢面相当于透镜。根据平行平板成像特性, 平行光束经平行平板折射后, 传播方向不改变, 但存在轴向位移, 柱镜在子午方向产生的位移量记为 ΔL_t 。

$$\Delta L_t = S'_t - S_t = \frac{n-1}{n}t, \quad (3)$$

透镜对光束的偏折位移可由高斯公式推导得出, 柱镜在弧矢方向产生的位移量记为 ΔL_s 。

$$\Delta L_s = S'_s - S_s = \frac{f_c L_c}{f_c + L_c} - L_c, \quad (4)$$

式中, n 为柱镜折射率, t 为柱镜厚度, f_c 为柱镜焦距。

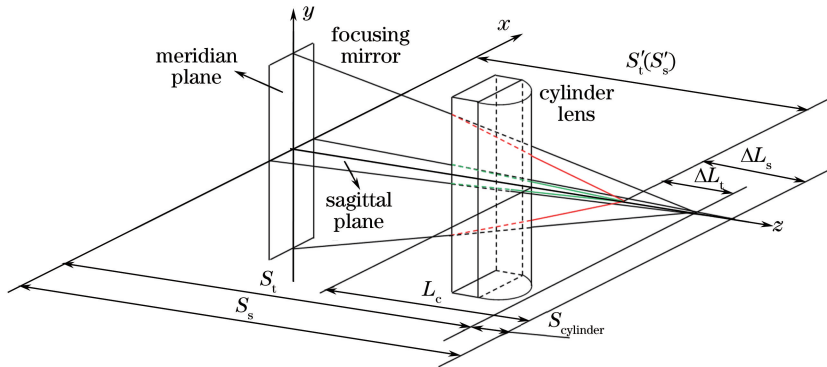


图 3 柱镜像散校正原理图

Fig. 3 Schematic diagram of astigmatism correction with cylindrical lens

由图 3 可以看出, 引入柱镜后的弧矢方向和子午方向产生一定的位移量, 其差值为柱镜的像散 S_{cylinder} , 可以表示为:

$$S_{\text{cylinder}} = \Delta L_t - \Delta L_s, \quad (5)$$

将(3)式和(4)式代入(5)式得:

$$S_{\text{cylinder}} = \frac{L_c^2}{f_c + L_c} + \frac{n-1}{n}t, \quad (6)$$

根据原光学系统的像散剩余情况,由(6)式确定柱镜引入的像散量,直接计算出柱镜与探测器之间的距离 L_c 。由柱镜像散的物理意义可知,通过改变柱镜的参数,可以分别实现柱镜弧矢方向位移量大于子午方向变化量,即 $S_{\text{cylinder}} > 0$;柱镜弧矢方向位移量等于子午方向变化量,即 $S_{\text{cylinder}} = 0$,此时柱镜的引入没有产生像散;柱镜弧矢方向位移量小于子午方向变化量,即 $S_{\text{cylinder}} < 0$ 。在柱镜参数 n 、 t 和 f_c 确定的情况下, L_c 大小是影响像散补偿的主要因素。

柱镜摆放方向影响边缘波长像散情况,如图4所示,柱镜有2种放置方案,即(a)长波距离补偿距离短,(b)短波距离补偿距离短。通过计算出边缘波长 L'_c 的大小,准确选取柱镜放置方案。柱镜倾角 γ 影响边缘波长像散的补偿,需要由复合校正理论进一步推导出精确计算公式。

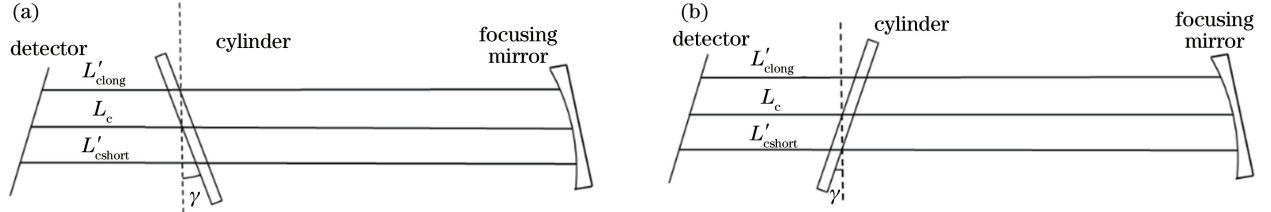


图4 柱镜放置方案。(a) $L'_{\text{clong}} < L_c < L'_{\text{cshort}}$; (b) $L'_{\text{clong}} > L_c > L'_{\text{cshort}}$

Fig. 4 Placement schemes of cylinder lens. (a) $L'_{\text{clong}} < L_c < L'_{\text{cshort}}$; (b) $L'_{\text{clong}} > L_c > L'_{\text{cshort}}$

3 复合方法校正理论及验证

3.1 复合方法校正理论

一阶消像散条件补偿方法与柱镜补偿方法两者不互相冲突,发散光路中引入柱镜,未改变光学元件间距离(狭缝与准直镜的间距 L_{sc} ,准直镜与光栅的间距 L_{cg} ,光栅与准直镜的间距 L_{gf} 和聚焦镜与探测器的间距 L_{fd})和各自倾角(准直镜离轴角 α_1 ,聚焦镜倾离轴角 α_2 和探测器倾角 σ),即在原有像散校正基础上,再进行剩余像散的补偿,拓宽波段校正宽度。

根据一阶消像条件下光学系统剩余像散的变化情况,确定柱镜相反的像散变化趋势;然后,令柱镜补偿方法的中心波长与原光学系统的中心波长一致,由于一阶消像散条件下中心波长处的剩余像散为0,则 $S_{\text{cylinder}} = 0$,由(6)式确定柱镜与探测器的距离 L_c ;最后,建立柱镜与一阶消像散条件之间的关系,推导出柱镜倾角 γ 公式,通过调整 γ 大小,直接改变边缘波长像散补偿情况,达到光学系统全波段像散同时校正的目的。

建立一阶消像散条件与柱镜补偿像散的关系,即令 $\frac{dS_{\text{cylinder}}}{d\lambda} = \frac{dS_{\text{remain}}}{d\lambda}$,有

$$\frac{dS_{\text{cylinder}}}{dL_c} \frac{dL_c}{dH} \frac{dH}{d\lambda} = \frac{dS_{\text{remain}}}{d\alpha_2} \frac{d\alpha_2}{d\theta} \frac{d\theta}{d\lambda}, \quad (7)$$

可以得到柱镜倾角 γ 。等式左边第1个微分项可以由(6)式对 L_c 微分得到,可以表示为:

$$\frac{dS_{\text{cylinder}}}{dL_c} = \frac{L_c^2 + 2L_c f_c}{(f_c + L_c)^2}, \quad (8)$$

等式左边2个微分项可以由几何关系求得,可以表示为:

$$\frac{dL_c}{dH} = \tan(\sigma + \gamma), \quad (9)$$

等式左边第3个微分项为线色散的倒数,可以表示为:

$$\frac{dH}{d\lambda} = \frac{R_2}{2d \cos \theta}, \quad (10)$$

等式右边可以由一阶消像散条件得到,可以表示为:

$$\frac{dS_{\text{remain}}}{d\alpha_2} = \frac{2S_s R_1 L_{sc} \sin \alpha_2}{2l(R_1 \cos \alpha_2 + R_2 \cos \alpha_1) - R_1 R_2} - \frac{2S_t R_1 L_{sc} \sec \alpha_2 \tan \alpha_2}{2L_{sc} \left(R_1 \sec \alpha_2 + R_2 \sec \alpha_1 \frac{\cos^2 i}{\cos^2 \theta} \right) - R_1 R_2 \frac{\cos^2 i}{\cos^2 \theta}} +$$

$$\frac{2S_1R_2 \frac{\cos^2 i}{\cos^2 \theta} \tan \theta (2L_{sc} \sec \alpha_1 - R_1)}{2L_{sc} \left(R_1 \sec \alpha_2 + R_2 \sec \alpha_1 \frac{\cos^2 i}{\cos^2 \theta} \right) - R_1R_2 \frac{\cos^2 i}{\cos^2 \theta}} \left(1 - \frac{L_{gf}}{R_2 \cos \alpha_2} \right)^{-1}, \quad (11)$$

等式右边第 2 个微分项由光栅与聚焦镜的几何关系^[10]即可得到,可以表示为:

$$\frac{d\alpha_2}{d\theta} = 1 - \frac{L_{gf}}{R_2 \cos \alpha_2}, \quad (12)$$

等式右边第 3 项微分项由光栅方程对 λ 微分整理得到,可以表示为:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{1}{d \cos \theta}, \quad (13)$$

将(8)~(13)式代入(7)式可以得到探测器倾角 σ 和柱镜倾角 γ 的关系,可以表示为:

$$\tan(\sigma + \gamma) = (K_1 - K_2) \frac{2(f_c + L_c)^2}{R_2(L_c^2 + 2L_c f_c)}, \quad (14)$$

式中

$$K_1 = \left[\frac{2S_s R_1 L_{sc} \sin \alpha_2}{2L_{sc} (R_1 \cos \alpha_2 + R_2 \cos \alpha_1) - R_1 R_2} - \frac{2S_1 R_1 L_{sc} \sec \alpha_2 \tan \alpha_2}{2L_{sc} \left(R_1 \sec \alpha_2 + R_2 \sec \alpha_1 \frac{\cos^2 i}{\cos^2 \theta} \right) - R_1 R_2 \frac{\cos^2 i}{\cos^2 \theta}} \right] \left(1 - \frac{L_{gf}}{R_2 \cos \alpha_2} \right), K_2 = \frac{2S_1 R_2 \frac{\cos^2 i}{\cos^2 \theta} \tan \theta (2L_{sc} \sec \alpha_1 - R_1)}{2L_{sc} \left(R_1 \sec \alpha_2 + R_2 \sec \alpha_1 \frac{\cos^2 i}{\cos^2 \theta} \right) - R_1 R_2 \frac{\cos^2 i}{\cos^2 \theta}},$$

探测器倾角 σ 可以表示为:

$$\tan \sigma = \frac{2R_1 L_{sc} \sin \alpha_2 S_s}{2L_{sc} (R_1 \cos \alpha_2 + R_2 \cos \alpha_1) - R_1 R_2 \left(1 - \frac{L_{gf}}{R_2 \cos \alpha_2} \right) + L_{gf} \tan \alpha_2} \left(L_{gf} + L_{fd} - \frac{2L_{gf} L_{fd}}{R_2 \cos \alpha_2} \right), \quad (15)$$

根据(14)~(15)式,可精确计算出复合校正方法的柱镜倾角 γ 。

3.2 复合方法理论验证

建立理论模型,通过对复合方法校正前和校正后光学系统像散剩余情况的计算,从理论仿真方面评价该校正方法。模拟理论剩余像散情况,要建立理论模型,需要求出聚焦镜入射角 $\alpha'_2(\lambda)$, 聚焦镜与探测器之间的距离 $L'_{fd}(\lambda)$ 和柱镜与聚焦镜的距离 $L'_{cc}(\lambda)$ 。分析光栅与聚焦镜之间的几何关系,可以得到不同波长下的 $\alpha'_2(\lambda)$ 、 $L'_{fd}(\lambda)$ 和 $L'_{cc}(\lambda)$, 光栅与聚焦镜之间的几何关系如图 5 所示,通过建立不同的矢量和关系推导出所需参数。

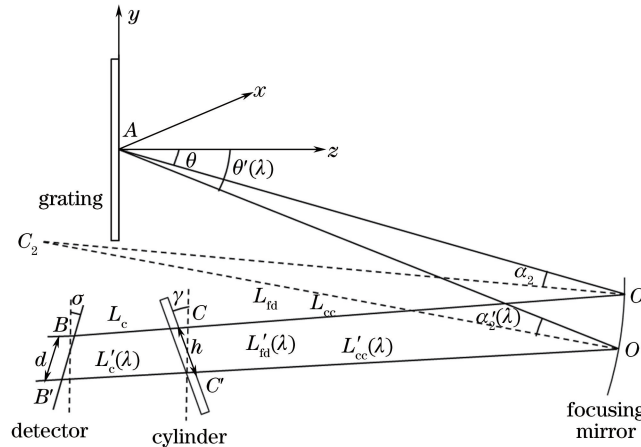


图 5 光栅与聚焦镜之间的几何关系图

Fig. 5 Geometric relations between grating and focusing mirror

采用图 5 所示的坐标系,则相应的矢量坐标为:

$$\mathbf{AO} = (L_{gf} \sin \theta, L_{gf} \cos \theta), \quad (16)$$

$$\mathbf{AO}' = (-L'_{gf} \sin \theta', L'_{gf} \cos \theta'), \quad (17)$$

$$\mathbf{C}_2\mathbf{O} = [-R_2 \sin(\theta - \alpha_2), R_2 \cos(\theta - \alpha_2)], \quad (18)$$

$$\mathbf{C}_2\mathbf{O}' = [-R_2 \sin(\theta' - \alpha'_2), R_2 \cos(\theta' - \alpha'_2)], \quad (19)$$

$$\mathbf{OB} = [L_{fd} \sin(\theta - 2\alpha_2), -L_{fd} \cos(\theta - 2\alpha_2)], \quad (20)$$

$$\mathbf{O}'\mathbf{B}' = [L'_{fd} \sin(\theta' - 2\alpha'_2), -L'_{fd} \cos(\theta' - 2\alpha'_2)], \quad (21)$$

$$\mathbf{OC} = [L_{cc} \sin(\theta - 2\alpha_2), -L_{cc} \cos(\theta - 2\alpha_2)], \quad (22)$$

$$\mathbf{O}'\mathbf{C}' = [L'_{cc} \sin(\theta' - 2\alpha'_2), -L'_{cc} \cos(\theta' - 2\alpha'_2)], \quad (23)$$

$$\mathbf{BB}' = [-d \cos(\theta - 2\alpha_2 + \sigma), -d \sin(\theta - 2\alpha_2 + \sigma)], \quad (24)$$

$$\mathbf{CC}' = [-h \cos(\theta - 2\alpha_2 + \gamma), -h \sin(\theta - 2\alpha_2 + \gamma)]. \quad (25)$$

由矢量和 $\mathbf{AO} + \mathbf{OC}_2 + \mathbf{C}_2\mathbf{O}' + \mathbf{O}'\mathbf{A} = 0$ 建立光栅与聚焦镜的几何关系,联立(16)~(19)式得:

$$-L_{gf} \sin \theta + R_2 \sin(\theta - \alpha_2) - R_2 \sin(\theta' - \alpha'_2) + L'_{gf} \sin \theta' = 0, \quad (26)$$

$$L_{gf} \cos \theta - R_2 \cos(\theta - \alpha_2) + R_2 \cos(\theta' - \alpha'_2) - L'_{gf} \cos \theta' = 0. \quad (27)$$

将(26)式与 $\cos \theta'$ 相乘,(27)式与 $\sin \theta'$ 相乘,再联立两式得:

$$\sin \alpha'_2(\lambda) = \sin(\theta' - \theta + \alpha_2) - \frac{L_{gf}}{R_2} \sin(\theta' - \theta). \quad (28)$$

在未引入柱镜的情况下,由矢量和 $\mathbf{C}_2\mathbf{O} + \mathbf{OB} + \mathbf{BB}' + \mathbf{B}'\mathbf{O}' + \mathbf{O}'\mathbf{C}_2 = 0$ 关系,联立(18)~(21)式和(24)式,整理得出:

$$T_1 = L'_{fd}(\lambda) = \frac{L_{fd} \cos \sigma + R_2 \cos [(\theta' - \theta) - (\alpha'_2 - 2\alpha_2)] - R_2(\alpha_2 - \sigma)}{\cos [(\theta' - \theta) - 2(\alpha'_2 - \alpha_2) - \sigma]}. \quad (29)$$

在引入柱镜的情况下,由矢量和 $\mathbf{C}_2\mathbf{O} + \mathbf{OC} + \mathbf{CC}' + \mathbf{C}'\mathbf{O}' + \mathbf{O}'\mathbf{C}_2 = 0$ 关系,联立(18),(19),(22),(23),(25)式,整理得出:

$$T_2 = L'_{cc}(\lambda) = \frac{L_{cc} \cos \sigma + R_2 \cos [(\theta' - \theta) - (\alpha'_2 - 2\alpha_2)] - R_2(\alpha_2 - \gamma)}{\cos [(\theta' - \theta) - 2(\alpha'_2 - \alpha_2) - \gamma]}. \quad (30)$$

根据(28)式可以得到 $\alpha'_2(\lambda)$,计算出一阶消像散条件下剩余像散 S_{remain} ,由(29)式和(30)式计算出 $L'_c(\lambda) = L'_{fd}(\lambda) - L'_{cc}(\lambda) - t$,即 $L'_c(\lambda) = T_1 - T_2 - t$,将其代入(6)式得到柱镜倾角 γ 与像散补偿 S_{cylinder} 的数学关系式,可以表示为:

$$S_{\text{cylinder}} = \frac{(T_1 - T_2 - t)^2}{f_c + (T_1 - T_2 - t)} + \frac{n-1}{n}t, \quad (31)$$

柱镜产生像散 S_{cylinder} 补偿一阶消像散条件下的剩余像散 S_{remain} ,最终光学系统的像散 S 可以表示为:

$$S = S_{\text{remain}} + S_{\text{cylinder}}, \quad (32)$$

由(32)式得到复合型 C-T 结构全波段像散校正情况,分别模拟 S_{remain} 、 S_{cylinder} 和 S 随波长变化的曲线,如图 6 所示。

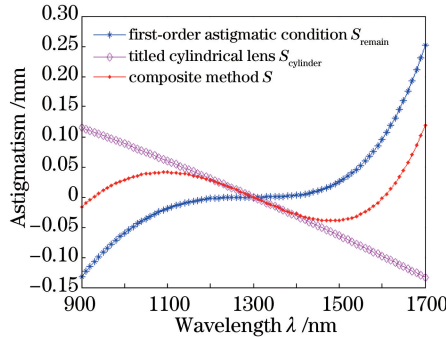


图 6 900~1700 nm 全波段像散校正情况

Fig. 6 Astigmatism correction over full spectral range of 900~1700 nm

由图 6 可以看出,柱镜像散变化趋势能够弥补一阶消像散条件的不足,使校正后的光学系统像散偏离程度趋近于 0。在 900~1300 nm 波段柱镜正像散能够校正一阶消像散条件负像散,在 1300~1700 nm 波段柱镜负像散能够校正一阶消像散条件正像散,两种方法复合后的全波段像散绝对值 $|S|$ 在 0.1 以下。复合方法提高了像散校正能力,相比于一阶消像散方法,像散被压缩了 3 倍左右,像散得到了很好的抑制。

4 实例验证及结果分析

4.1 设计实例

根据已论述的复合校正方法,设计了 1 个宽波段像散同时校正的 C-T 结构光学系统,该光学系统在保证光谱分辨率的情况下,实现了近红外 900~1700 nm 波段像散的校正,光谱校正宽度为 800 nm,初始结构基本参数如表 1 所示。

根据初始的基本参数,用 Matlab 理论计算出的合理结构参数,如表 2 所示,导入光学设计软件 Zemax 中进行光线追迹和设计优化。图 7 为复合方法校正像散的复合型 C-T 结构光路图。

表 1 消像散 C-T 结构基本参数

Table 1 Basic parameters of anastigmatic C-T structure

Characteristic	Value
Wavelength range	900~1700 nm
F number	8
Grating groove	300 lp/mm
Slit dimensions	1 mm \times 25 μ m
Pixel size of detector	50 μ m \times 250 μ m
Number of pixel	256
Focal length of cylindrical lens	100 mm
Thickness of cylindrical lens	5 mm
Refractive index of cylindrical lens	1.46

表 2 复合方法消像散 C-T 结构设计参数

Table 2 Designed parameters of anastigmatic C-T structure of composite method

Specification	Initial parameter	Optimized parameter
λ_c	1300 nm	1300 nm
α_1	7°	6.963°
α_2	10°	9.761°
i	6°	5.769°
R_1	180 mm	181.832 mm
R_2	180 mm	178.315 mm
L_{sc}	77.929 mm	77.928 mm
L_{cg}	90 mm	91.123 mm
L_{gf}	66.898 mm	76.902 mm
L_{fd}	109.429 mm	105.267 mm
σ	15.935°	14.367°
f_{cs}	100 mm	79.674 mm
t	5 mm	5.083 mm
L_c	11.788 mm	11.701 mm
γ	14.569°	14.614°

4.2 结果分析

选取狭缝中点和边缘端点等 9 个不同位置作为视场,分析不同视场不同波长下的点列图和光学调制传递函数(MTF)曲线,以便更全面地分析设计结果。图 8(a)和(b)给出了一阶消像散条件下 C-T 结构边缘波长的点列图,(c)为中心波长的点列图;图 9(a)和(b)给出了复合型 C-T 结构边缘波长的点列图,(c)为中心波长的点列图。比较图 8 和图 9 可知,一阶消像散条件不能有效抑制宽波段边缘波长的像散,复合型 C-T

结构的边缘波长和中心波长在狭缝两维方向的像散能够被同时校正,且效果良好。全波段全视场的点列图如图 10 所示,均方根(RMS)值均在 $14 \mu\text{m}$ 以下,小于探测器单个像元尺寸。结果表明,复合方法能够实现宽波段 C-T 结构像散的同时校正。

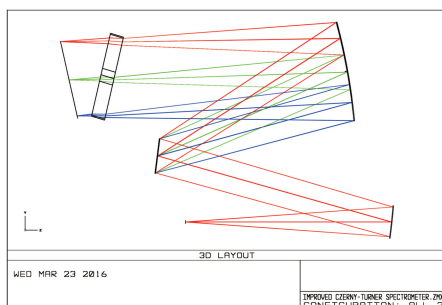


图 7 复合型 C-T 结构光路图

Fig. 7 Layout of composite C-T structure

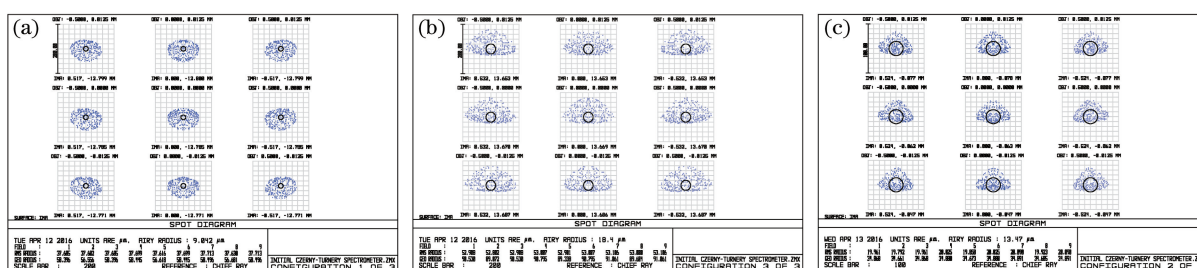


图 8 一阶消像散条件下 C-T 结构点列图。(a) 边缘波长 900 nm; (b) 边缘波长 1700 nm; (c) 中心波长 1300 nm

Fig. 8 Spot diagrams for first-order astigmatic condition of C-T structure. (a) Marginal wavelength of 900 nm;

(b) marginal wavelength of 1700 nm; (c) central wavelength of 1300 nm

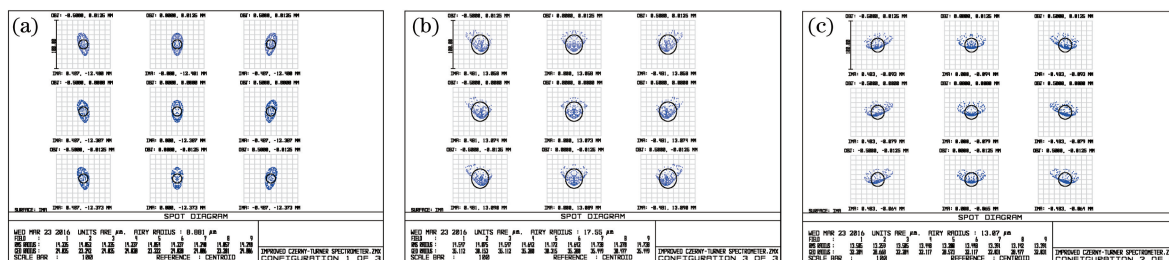


图 9 复合型 C-T 结构点列图。(a) 边缘波长 900 nm; (b) 边缘波长 1700 nm; (c) 中心波长 1300 nm

Fig. 9 Spot diagram for composite C-T structure. (a) Marginal wavelength of 900 nm;

(b) marginal wavelength of 1700 nm; (c) central wavelength of 1300 nm

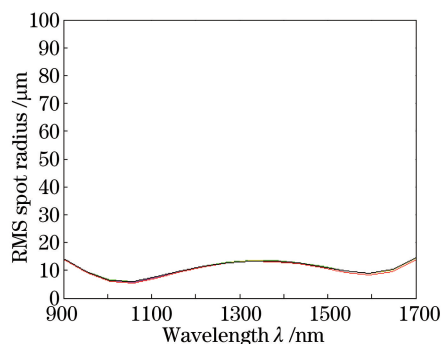


图 10 全视场全波段 RMS 随波长变化曲线

Fig. 10 RMS changes with wavelength at all wavelengths and full fields of view

图 11 给出了复合型 C-T 结构中心波长与边缘波长的足迹图,根据瑞利判据可知,该光学系统全波段的

光谱分辨率可达到 1.5 nm。结果表明,复合方法能够校正近红外 800 nm 宽波段像散的同时,能够保证高光谱分辨率,体现该方法的优越性。图 12 给出了中心波长与边缘波长各视场的 MTF 曲线,探测器像元尺寸为 $50\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}$,则 MTF 曲线的采样频率为 10 lp/mm,中心波长与边缘波长处全视场的 MTF 值均达到 0.7。证明了复合方法在校正宽波段 C-T 结构像散的同时,在全波段全视场有良好的成像质量。

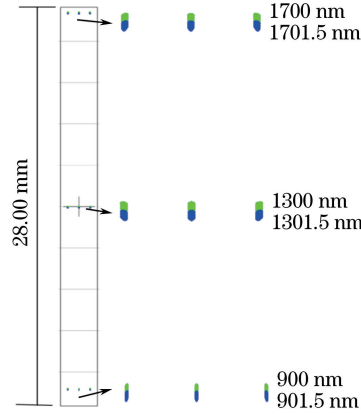


图 11 足迹图

Fig. 11 Footprint diagram

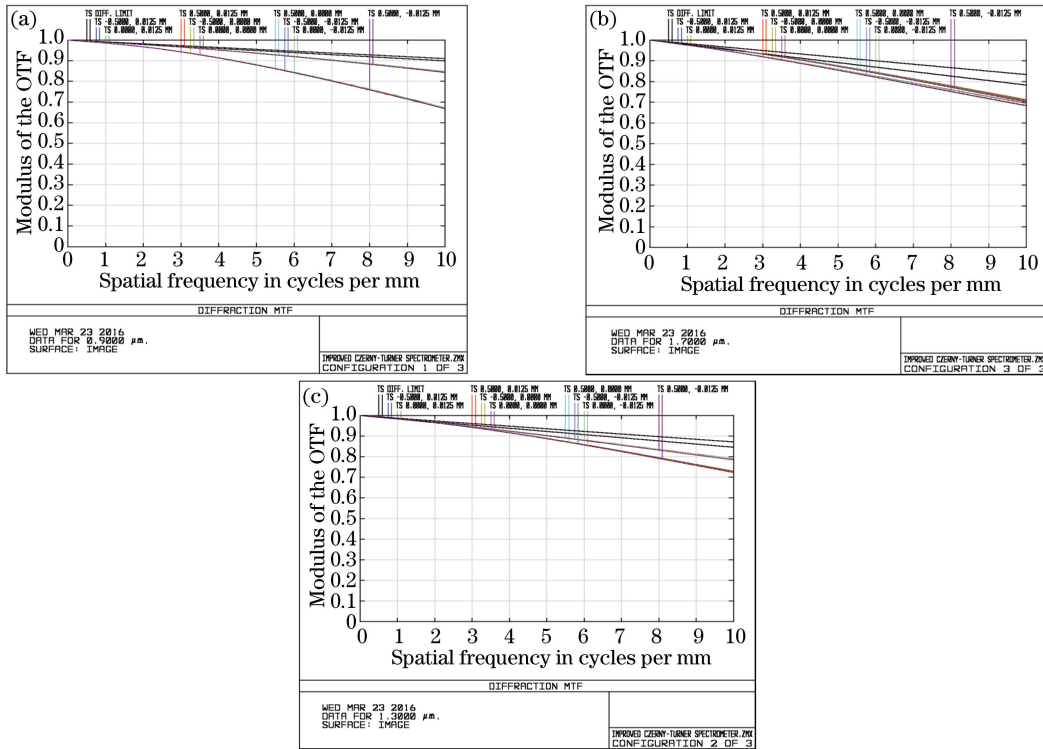


图 12 复合型 C-T 结构的 MTF 曲线。(a) 边缘波长 900 nm; (b) 边缘波长 1700 nm; (c) 中心波长 1300 nm

Fig. 12 MTF curves of composite C-T structure. (a) Marginal wavelength of 900 nm;

(b) marginal wavelength of 1700 nm; (c) central wavelength of 1300 nm

5 结 论

为实现宽波段 C-T 结构像散的校正,基于像差理论,提出了一种复合方法校正 C-T 结构像散,利用柱镜的相反像散变化趋势,补偿原光学系统的剩余像散。推导出复合方法的柱镜倾角公式,通过调整柱镜倾角大小,改变边缘波段像散的补偿能力,实现近红外 800 nm 宽波段像散的校正。

设计了一个覆盖近红外宽光谱的复合型 C-T 结构实例,利用 Matlab 软件理论计算出各参数,再将其导

入到 Zemax 光学设计软件中,对复合型 C-T 结构进行光线追迹和结构优化,并对设计结果进行了分析。设计结果表明,全波段全视场 RMS 值均小于 $14\ \mu\text{m}$,小于探测器单个像元尺寸,光谱分辨率为 $1.5\ \text{nm}$,MTF 值达到 0.7 以上。分析结果说明,复合校正方法能够实现宽波段像散校正的同时具有高光谱分辨率,成像质量良好,能量集中在像点处的优越性。复合方法适用于其他波段消像散设计,也为宽波段像散校正提供了思路和参考。

参 考 文 献

- 1 Sun Ci, Yao Xuefeng, Cui Jicheng, *et al.* Mineral spectrum measurement based on shortwave infrared imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(2): 0230001.
孙 慈,姚雪峰,崔继承,等. 基于短波红外成像光谱仪的矿石光谱测量[J]. *光学学报*, 2016, 36(2): 0230001.
- 2 Liu Bing, Liu Ying, Li Can, *et al.* Design of optical system for miniature visible/near-infrared real-time imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(6): 0630002.
刘 兵,刘 英,李 灿,等. 轻小型可见/近红外实时成像光谱仪的光学系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(6): 0630002.
- 3 Zhao Minjie, Si Fuqi, Lu Yihuai, *et al.* Spectral image correction method for space-born differential optical absorption spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1230002.
赵敏杰,司福祺,陆亦怀,等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪光谱图像校正方法研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(12): 1230002.
- 4 Chen Hongyao, Zhang Liming, Li Xin, *et al.* Hyperspectral sensor in flight spectral calibration based on characteristic spectra of atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0528003.
陈洪耀,张黎明,李 鑫,等. 高光谱遥感器飞行中基于大气特征谱线的光谱定标技术[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0528003.
- 5 Bates B, McDowell M, Newton A C. Correction of astigmatism in a Czerny-Turner spectrograph using a plane grating in divergent illumination[J]. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1970, 3(3): 206-210.
- 6 Masayuki F, Takehiko T, Kei-ichi K. Highly efficient and aberration-corrected spectrometer for advanced Raman spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(22): 4655-4665.
- 7 Xu L, Chen K X, He Q S, *et al.* Design of freeform mirrors in Czerny-Turner spectrometers to suppress astigmatism[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(15): 2871-2879.
- 8 Austin D R, Witting T, Walmsley I A. Broadband astigmatism-free Czerny-Turner imaging spectrometer using spherical mirrors[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(19): 3846-3853.
- 9 Xue Qingsheng, Chen Wei. Design of modified Czerny-Turner spectral imaging system with wide spectral region[J]. *Optics and precision Engineering*, 2012, 20(2): 233-240.
薛庆生,陈 伟. 改进的宽波段车尔尼-特纳光谱成像系统设计[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(2): 233-240.
- 10 Lee K S, Thompson Kevin P, Rolland J P. Broadband astigmatism-corrected Czerny-Turner spectrometer[J]. *Optics Express*, 2010, 18(22): 23378-23384.
- 11 Xue Q S. Astigmatism-corrected Czerny-Turner imaging spectrometer for broadband spectral simultaneity[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(10): 1338-1344.
- 12 Qu B X, Guo X, Yu F H. Optimization of freeform cylindrical lens in Czerny-Turner spectrometer system to correct the astigmatism by using user defined error function[C]. *SPIE*, 2012, 8416: 84161I.
- 13 Liu Jianpeng, Tang Yi, Huang Gang, *et al.* Design method of optical system of improved Czerny-Turner imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0322007.
刘健鹏,唐 义,黄 刚,等. 改进型 Czerny-Turner 成像光谱仪光学系统设计方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0322007.