

宽谱段消像散 Czerny–Turner 光谱仪光学系统设计

赵意意^{1,2}, 杨建峰¹, 薛彬¹, 闫兴涛^{1,2}

- (1. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对光谱仪小型化、高分辨率的发展趋势, 设计了一种结构简单、宽谱段、消像散的小型光谱仪。具体分析了折叠光路 Czerny–Turner 光谱仪各种像差的原理和校正方法。推导了柱透镜宽谱段消像散的理论方程。作为实例, 设计了一款谱段为 300~900 nm、物方数值孔径 0.08 的小型光谱仪。该光谱仪采用折叠光路结构以减小尺寸, 添加柱透镜以消除整个谱段的像散。结果表明: 该光谱仪结构简单紧凑, 体积小, 实现了宽谱段的消像散, 全谱段光谱分辨率优于 0.5 nm。

关键词: 光谱仪; 光学设计; 柱透镜; 宽谱段; 消像散

中图分类号: O433.1; TH744.1 文献标志码: A 文章编号: 1007-2276(2014)04-1182-06

Optical system design of broadband astigmatism-free czerny–turner spectrometer

Zhao Yiyi^{1,2}, Yang Jianfeng¹, Xue Bin¹, Yan Xingtao^{1,2}

- (1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: For the development trend of miniaturization and high-resolution of spectrometer, an optical design with a simple structure, broadband, astigmatism-corrected micro spectrometer was designed. The principle and correction method of the aberration of crossed beam czerny–turner spectrometer were analyzed in detail. The broadband astigmatism-corrected theory equations using cylindrical lens were deduced. For example, a micro spectrometer operating in 300–900 nm with an object NA of 0.08 has been designed. This spectrometer adopted crossed beam structure to minish its volume and used a cylindrical lens to remove astigmatism over the full bandwidth. The analyzed results demonstrated that this spectrometer with compact configuration and small volume corrected the astigmatism in the wide spectral region. The resolution of the spectrometer was better than 0.5 nm in the whole spectral region.

Key words: spectrometer; optical design; cylindrical lens; broadband; astigmatism-corrected

收稿日期: 2013-08-10; 修订日期: 2013-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(60808028); 国家 863 计划(2009AA122203); 中国科学院光谱成像重点实验室开放基金

作者简介: 赵意意(1988-), 男, 博士生, 主要从事光学设计方面的研究。Email: zyzjlx@gmail.com

导师简介: 杨建峰(1969-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事光学设计与光谱成像方面的研究。Email: yangjf@opt.ac.cn

0 引言

小型化是光谱仪发展的一个重要趋势。小型光谱仪具有结构紧凑、体积小、质量轻、探测速度快、使用方便、耗耗材少、性能稳定、寿命长、可集成化、可批量生产以及成本低廉等优点。此外它还具有二次开发性能,可以利用微小光谱仪来进一步制造其他分析仪器^[1-2]。Czerny-Turner 结构是小型光谱仪最常采用的结构,因为这种结构仅由两块球面镜和一块平面光栅组成,具有结构简单、成本低廉等特点^[3]。19 世纪,Czerny、Turner 和 Shafer 等人针对 Czerny-Turner 结构提出了比较完善的消除球差和彗差的理论^[4-5]。在 20 世纪以前,人们很少去消除 Czerny-Turner 结构的像散,因为像散是子午像面和弧矢像面二者沿光轴方向的偏离距离,它对光谱仪仅关注的一维分辨率即光谱维的分辨率影响较小。有时像散所造成的谱线展宽超出了探测器的宽度,为了获得谱线强度沿高度分布均匀的线段则有意识地放大像散^[6]。但随着光谱仪小型化、高速化的发展,像散成为了影响光谱仪性能的主要因素之一。象散的存在降低了光谱仪的能量收集效率,增加了积分时间。因此一些消除像散的方法被提出,例如将平面光栅置于发散光路中^[7-8],使用超环面反射镜^[9],增加额外的反射镜面^[10],使用凹面或凸面光栅^[11-12]等。但这些方法也有其局限性,将平面光栅置于发散光中的方法其光谱范围较窄,使用该方法的参考文献[7-8],其光谱范围均小于 300 nm。使用超环面和凹面光栅的方法则成本太高,不利于民用和批量生产。增加额外的反射面则会造成结构臃肿,不利于光谱仪的小型化。

国内已经有一些关于 Czerny-Turner 光谱仪的研究,如中国科学院长春光学精密机械物理研究所的薛庆生等采用超环面和发散光路来改进 Czerny-Turner 光谱仪,北京理工大学刘健鹏等在 Czerny-Turner 光谱仪中加入柱面反射镜来消除象散。但这些研究主要集中在成像光谱仪上,对小型化非成像光谱仪研究较少。

文中在分析比较以上方法的优缺点后,提出了利用柱透镜消除 Czerny-Turner 结构的象散,并采用折叠光路 Czerny-Turner 结构设计了光谱范围在 300~900 nm 的小型光谱仪。通过软件模拟验证所设

计的光谱仪具有结构紧凑,装调简单,成本较低,消除象散,光谱分辨率高等优点。

1 折叠光路 Czerny-Turner 结构像差分析

折叠光路 Czerny-Turner 结构相对于普通 Czerny-Turner 结构具有结构紧凑、消杂光能力强等特点^[1],在光谱仪小型化方面有很大的优势。但同时,折叠光路 Czerny-Turner 结构由于空间结构的要求却有着更大的离轴角。普通 Czerny-Turner 结构离轴角一般在 5°~10°,而折叠光路 Czerny-Turner 结构离轴角一般 15°~25°甚至更大,这样会造成更大的像散,使设计更加困难。

虽然在空间位置上不同,折叠光路 Czerny-Turner 结构与普通 Czerny-Turner 结构却有着基本相同的像差特征。球差会使谱线均匀的展宽,因此必须控制球差在像差容限内。球差主要受相对孔径的影响。根据瑞利判据,球差造成的波像差要小于四分之一波长,得:

$$f \leq 256\lambda F^4 \quad (1)$$

式中: f 为球面镜的焦距; λ 为波长; F 为光谱仪的 F 数。

彗差会使谱线轮廓展宽,并且造成谱线单边扩散,严重影响分辨率。Shafer 提出了 Czerny-Turner 结构消彗差的条件^[4]:

$$\frac{\sin\alpha_2}{\sin\alpha_1} = \frac{R_2^2}{R_1^2} \left(\frac{\cos i}{\cos\theta} \right)^3 \left(\frac{\cos\alpha_2}{\cos\alpha_1} \right)^3 \quad (2)$$

式中: R_1 、 R_2 分别表示准直镜和聚焦镜的曲率半径, α_1 、 α_2 分别表示准直镜和聚焦镜的离轴角; i 、 θ 分别为光栅入射角和衍射角。在普通 Czerny-Turner 结构中,因为 α_1 、 α_2 较小,在计算中一般可将最后一项忽略,但如前所述折叠光路 Czerny-Turner 结构离轴角较大,该项不可略去。

普通光学系统在像质评价时,子午方向和弧矢方向的像差是同等重要的。但对于未消像散的光谱仪系统来说,为了保证光谱分辨率,常常更注重子午方向的像差。系统的误差函数可以表达为:

$$\phi = \sum_{\lambda} WTW(\lambda) [WTX \cdot \Delta X^2 + WTY \cdot \Delta Y^2] \quad (3)$$

式中: WTW 表示波长的权重; WTX 、 WTY 表示弧矢方

向偏移量和子午方向偏移量的权重; ΔX 、 ΔY 分别表示弧矢方向和子午方向的偏移量。未消像散前,对系统的优化,应增大子午方向相对于弧矢方向的权重,甚至令弧矢方向的权重为零。这样能保证最好的子午方向的像质,从而得到最好的光谱分辨率。在消像散后,也并不一定要令子午方向和弧矢方向的权重相等,要根据实际像元尺寸的长宽比,以及像质变化趋势等来进一步判断。光谱仪器的像散并不影响光谱分辨率。但对于小型光谱仪,由于体积的限制本身收集的能量就很低,谱线展宽所造成的能量损失就显得尤为明显,所以消像散成为小型光谱仪的必要条件。

2 柱透镜消像散的原理

Czerny-Turner 结构的像散主要是由准直镜和成像镜两个倾斜球面所造成的,如图 1 虚线部分所示。当加入柱透镜后,在合适的距离、厚度、曲率等条件下,可以消除像散,如图 1 实线部分所示。柱透镜

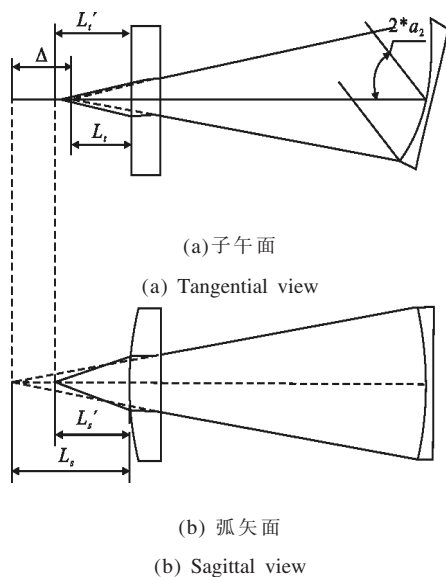


图 1 柱透镜示意图

Fig.1 Layout of cylindrical lens

在子午面和弧矢面的投影是不同的,其第二个面在子午面内投影曲率为零,而在子午面内则为一凸球面。因此,在子午面中,柱透镜相当于平行平板,它会使焦点后移;在弧矢面内柱透镜相当于平凸透镜,它有聚焦作用,使焦点前移。根据成像公式,可以得到,子午面焦点的变化量:

$$L_i' - L_i = d(1 - 1/n) \quad (4)$$

式中: L_i 和 L_i' 分别为子午面内对于柱透镜成像的物距和像距; d 为柱透镜的中心厚度; n 为柱透镜的折射率。弧矢面内的成像公式为:

$$1/L_s' - 1/L_s = 1/f_{cs} \quad (5)$$

式中: L_s 和 L_s' 分别为弧矢面内对于柱透镜成像的物距和像距; f_{cs} 为柱透镜弧矢面的焦距。

图 1 中,系统的像散量可以表示为:

$$\Delta = L_i' - L_i + L_s - L_s' \quad (6)$$

将公式(4)、(5)带入公式(6),可得到关于 L_s 的方程:

$$L_s^2 - [\Delta - (n-1)d/n]L_s - [\Delta - (n-1)d/n]f_{cs} = 0 \quad (7)$$

由公式(7)可以得到柱透镜位置 L_s 系统像散 Δ 、柱透镜结构参数 n 、 d 和 f_{cs} 之间的关系。根据公式(7)就可以通过柱透镜消除系统中心波长的像散。

公式(7)提到的条件仅是在中心波长处的像散校正条件,而系统像散量 Δ 是随着波长变化的。不同波长的光束在光栅上有不同的衍射角,造成其在聚焦镜上的离轴角不同,进而造成不同波长的光束像散 Δ 的不同。为了满足公式(7)以消除各波长处的像散,需要方程中柱透镜位置 L_s 、柱透镜结构参数 n 、 d 和 f_{cs} 等 4 个参量中至少有一个参量能随像散 Δ 变化。柱透镜作为一个实体器件,其参数是不能改变的。因此,可以通过倾斜柱透镜,使柱透镜与像面产生夹角 β ,从而使柱透镜位置 L_s 也随波长变化以尝试消除整个谱段的像散。还有文献提出用自由面型的柱透镜来消除整个谱段的像散。

3 设计实例与结果分析

根据上述理论,设计一台消慧差的小型 Czerny-Turner 光谱仪,然后再在其像面与聚焦镜之间添加柱透镜消除像散,以分析柱透镜消像散的能力。光谱仪光谱范围选定 300~900 nm。光通过光纤进入狭缝,光纤的数值孔径为 0.08。基于对系统能量和可变狭缝的考虑使用了较大数值孔径的光纤,可以通过适当调整狭缝降低数值孔径以减小球差。半部系统的数值孔径与光纤相同,可以计算出整个系统的 F 数为 6.25。采用的 CCD 像元数为 3 648,像元尺寸为 $8 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$,像面长度 29.1 mm。可以估算出聚焦镜的焦距为 63 mm,因此确定聚焦镜和准直镜的半

径为 126 mm。选定准直镜的离轴角为 10°,光栅的入射角为 5°,根据光栅方程由光栅入射角为 5°计算出光栅出射角为 24.655°。通过消慧差公式(2)可以计算出聚焦镜的离轴角为 13.22°。由此建立起了光谱仪的初始结构。设置子午方向与弧矢方向的权重之比为 1:0,对系统进行优化。光谱仪初始结构及优化后的结构参数如表 1 所示。

表 1 光谱仪初始和优化结构参数

Tab.1 Spectrometer initial and optimized parameters

Parameter	Initial value	Optimized value
R_1	126	124.302 7
R_2	126	125
α_1	10	11
α_2	13.22	15.9
i	5	5
θ	24.655	24.655

此时,光谱仪在 600 nm 和 600.5 nm 处的点列图如图 2 所示。可以看出,在未消像散时,光谱仪在光



图 2 中心波长未消像散点列图

Fig.2 Spot diagrams of central wavelength with astigmatism

谱维的分辨率依然很高,优于 0.5 nm。但其在垂直光谱维的方向上谱线展宽相当严重,600 nm 处的谱线展宽已接近 200 μm , 软件追迹在 800 nm 处的谱线展宽甚至超过了 500 μm ,而笔者所选择的线阵 CCD 的宽度为 200 μm , 这样就会造成谱线的能量损失,极大增加了光谱仪的积分时间,且损失能量的比例随波长变化,极大的影响了光谱仪的性能。图 3 给出了未消象散系统在 300 nm、600 nm、900 nm 处的 MTF 曲线。从图中可以看出,系统在三个波长处的子午光束的 MTF 接近衍射极限,而弧矢光束的 MTF 截止频率小于 4 cycles/mm。

在上述光谱仪像面与聚焦镜之间加入柱透镜后,柱透镜采用 k9 玻璃。并重新设置子午方向与弧矢方向的权重之比为 1:1,对系统进行优化。但是注意到 CCD 的像元尺寸为 8 μm ×200 μm , 有足够的

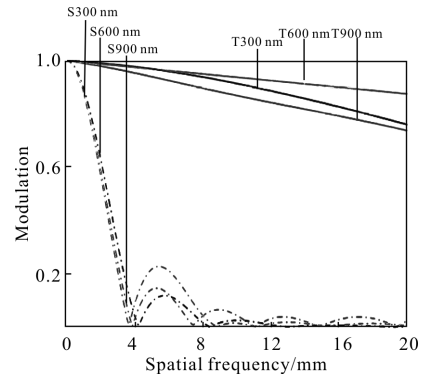


图 3 未消像散时各波长下的 MTF

Fig.3 MTF at different wavelengths with astigmatism

宽度,为了保证系统的光谱分辨率应适当增加子午方向的权重比率。经反复优化比对,子午方向与弧矢方向的权重之比为 2:1 时,全波段的光谱分辨率最好。系统最终设计结果如图 4 所示。整个光谱仪的体积为 70 mm×68 mm×12 mm, 仅有巴掌大小,实现了光谱仪的小型化设计。

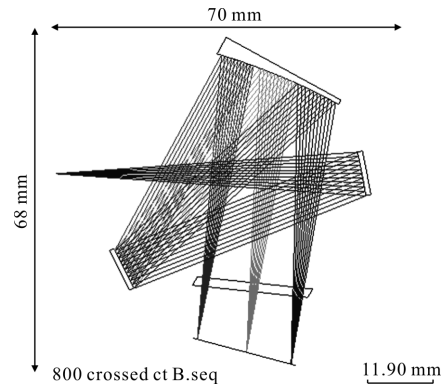


图 4 加入柱透镜的折叠光路 Czerny-Turner 光谱仪示意图

Fig.4 Layout of crossed Czerny-Turner spectrometer with a cylindrical lens

加入柱透镜消除像散以后,光谱仪各波长点列图如图 5 所示。由图可知,在 450 nm、600 nm、750 nm、900 nm 四个波长处,相隔 0.5 nm 的两个波长点列图都分离得很好,说明其光谱分辨率一

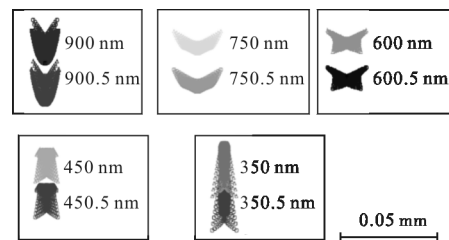


图 5 五组波长的点列图

Fig.5 Spot diagram of five pairs of wavelength

定优于 0.5 nm。尽管在 300 nm 处相隔 0.5nm 的两个波长点列图会有部分重合,但是根据瑞利判据即使部分重合的点也能分辨,即一个点的点列图中心与另一个点的点列图边缘重合时,则这两个点刚好能分辨。根据光线追迹结果,300 nm 和 300.5 nm 处的点列图中心的距离为 9.35 μm ,而其 RMS 点列图半径为 6.15 μm ,证明 300 nm 和 300.5 nm 可以分辨开。因此可以得出结论:所设计的光谱仪全谱段光谱分辨率优于 0.5 nm,并且由各波长点列图形状可以得出结论:系统全谱段像散都控制的很好。图 6 给出了全谱段点列图均方根直径。由图 6 可以看出,全谱段点列图均方根直径在 5~13 μm 之间,光谱仪全谱段成像质量良好。

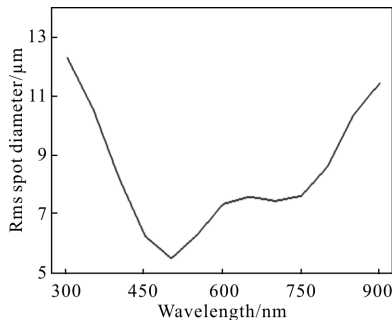


图 6 点列图均方根直径

Fig.6 RMS spot diameter

图 7 给出了消象散后系统在各波长处的 MTF 曲线。对比图 3 可以看出消象散后系统弧矢面内的成像质量大为改善,已经接近衍射极限,且子午光束保持了未消象散时良好的成像质量。

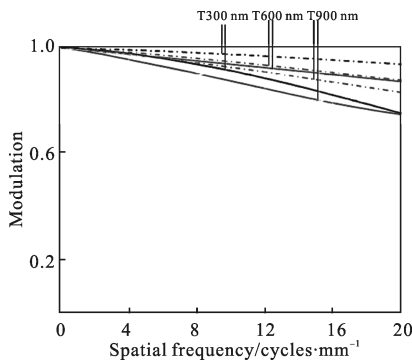


图 7 系统各波长下的 MTF

Fig.7 MTF at different wavelengths

4 结论

根据光谱仪小型化、高分辨率的发展趋势,文中

提出了采用折叠光路 Czerny-Turner 结构以减小尺寸,添加柱透镜以消除全谱段像散的光谱仪结构,并系统地论述了该种结构的像差特性与像差矫正的方法。使用该种结构设计了工作谱段为 300~900 nm,物方数值孔径 0.08 的小型光谱仪。利用 Code V 软件进行仿真模拟优化。分析结果表明,该光谱仪结构简单紧凑,体积小,实现了宽谱段的消像散,全谱段光谱分辨率优于 0.5 nm。以上分析表明,折叠光路 Czerny-Turner 结构配合柱透镜的光谱仪形式是实现光谱仪小型化、高分辨率的很好的一种结构形式。

参考文献:

- [1] Jia Hui, Yao Yong. Characteristics of typical optical systems with diffractive gratings of micro-spectrometers and improvement of spectrometer's resolution [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27 (8): 1653-1656. (in Chinese)
贾辉,姚勇. 微小型光栅光谱仪光学系统的特点与光谱分辨率的提高 [J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27 (8): 1653-1656.
- [2] Li Hongsheng, Liao Yanbiao. Fiber slit spectrometer MTF measurement by using grating ghost line and Fourier analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 770-774. (in Chinese)
李宏升,廖延彪. 利用鬼线及傅里叶分析测量光纤狭缝光谱仪 MTF[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 770-774.
- [3] Lin Zhong, Fan Shifu. Spectral Instruments [M]. Beijing: China Machine Press, 1988: 114-118. (in Chinese)
林中,范世福. 光谱仪器学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988: 114-118.
- [4] Czerny M, Turner A. über den Astigmatismus bei Spiegelspektrometern[J]. *Z Phys*, 1930, A (61): 792-797.
- [5] Arthur B Shafer, Lawrence R Megill, Leann Droppleman. Optimization of the Czerny-Turner spectrometer [J]. *J Opt Soc Am*, 1964, 54: 879-887.
- [6] Cheng Peng. Design principles and parameters analysis of a small grating spectrometer[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2008: 36-37. (in Chinese)
程鹏. 一种小型光栅光谱仪的设计原理及参数分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008: 36-37.
- [7] 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.
(in Chinese)
薛庆生,陈伟. 改进的宽谱段车尔尼-特纳光谱成像系统设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(2): 233-240.
- [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, Wang Shurong, Lu Fengqin. Aberration correction of Czerny-Turner imaging spectrometer carried by satellite [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 29 (1): 35-40. (in Chinese)
薛庆生,王淑荣,鲁凤芹. 星载车尔尼-特纳型成像光谱仪像差校正的研究[J]. 光学学报, 2008, 29(1): 35-40.
- [10] Rosendahl G R. Contributions to the optics of mirror systems and gratings with oblique incidence III Some applications[J]. *J Opt Soc Am*, 1962, 52(4): 412-415.
- [11] Kong Peng, Tang Yuguo, Bayanheshig, et al. Optimization of broad-band flat-field holographic concave grating without astigmatism[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32 (2): 565-569. (in Chinese)
孔鹏,唐玉国,巴音贺希格,等. 零像散宽波段平场全息凹面光栅的优化设计 [J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(2): 565-569.
- [12] Ji Yiqun, Shen Weimin. Design and manufacture of Offner convex grating hyper-spectral imager[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(2): 285-287. (in Chinese)
季轶群,沈为民. Offner 凸面光栅超光谱成像仪的设计与研制[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 285-287.