



DOI: 10.12086/oe.2018.180228

## 超高分辨力微型光谱仪的光学系统设计

王贤俊, 龙亚雪, 郑海燕, 郭汉明\*

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

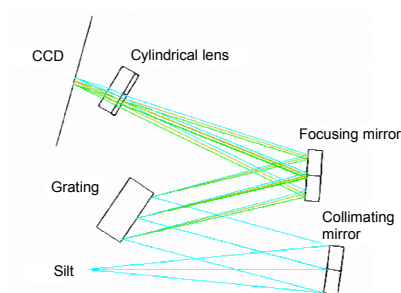
**摘要:** 由于光谱仪的尺寸限制, 微型光谱仪在满足一定光谱范围时, 其分辨力往往难以小于 0.1 nm。而一些特殊应用场合要求光谱仪不仅具有微小的尺寸, 还要求具有极高的光谱分辨力。本文基于 Zemax 光学设计软件, 通过选择合适的初始结构参数与评价函数, 自动优化准直镜、聚焦镜、柱透镜、光栅, 以及 CCD 间倾角和距离, 设计出光谱分辨力高达 0.05 nm, 尺寸为 90 mm×130 mm×40 mm 的 Czerny-Turner 结构微型光谱仪。在此基础上优化出 8 个光栅倾斜角度, 使微型光谱仪光谱分辨力在优于 0.05 nm 的同时, 波段范围达到了 820 nm~980 nm。所设计的光谱仪具有超高的光谱分辨力、微小的外形尺寸与适中的光谱范围等特点。

**关键词:** 微型光谱仪; 光谱分辨力; Czerny-Turner 结构; Zemax

**中图分类号:** TN202

**文献标志码:** A

**引用格式:** 王贤俊, 龙亚雪, 郑海燕, 等. 超高分辨力微型光谱仪的光学系统设计[J]. 光电工程, 2018, 45(10): 180228



## Design of optical system of miniature spectrometer for ultrahigh-resolution

Wang Xianjun, Long Yaxue, Zheng Haiyan, Guo Hanming\*

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

**Abstract:** Because of the size limit of the spectrometer, the resolution of the micro-spectrometer is usually difficultly less than 0.1 nm when it meets certain spectral range. While some special applications require that the spectrometer not only has small size, but also requires extremely high spectral resolution. We used Zemax (optical design software) to choose the initial structure parameters and evaluation function to automatically optimize angle and distance of focus lens, cylindrical lens and CCD to design an optical system of spectrometer of Czerny-Turner structure. Its resolution is better than 0.05 nm, and the volume of the system is 90 mm×130 mm×40 mm. On this basis, eight grating slanting angles were optimized, and the spectral resolution of the micro-spectrometer is better than 0.05 nm, while the band range reaches 820 nm~980 nm. So the spectrometer has the characteristics of high resolution, wide spectrum and small volume.

**Keywords:** micro-spectrometer; resolution; Czerny-Turner structure; Zemax

**Citation:** Wang X J, Long Y X, Zheng H Y, *et al.* Design of optical system of miniature spectrometer for ultrahigh-resolution[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, 45(10): 180228

收稿日期: 2018-04-26; 收到修改稿日期: 2018-07-03

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFF0101603)

作者简介: 王贤俊(1993-), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计的研究。E-mail: wangxianjunjiayou@163.com

通信作者: 郭汉明(1977-), 男, 博士, 教授, 主要从事超分辨率光学显微成像和光谱技术的研究。E-mail: hmguo@usst.edu.cn

## 1 引言

光谱能够反映物质分子结构信息,在生物、化学、医药材料、食品工业以及地质勘探等领域起着重要的作用<sup>[1-2]</sup>。随着科学技术日新月异的发展和众多前沿学科的互相交叉、渗透和融合,对光谱仪提出了宽光谱、高分辨力、小型化等一系列新要求,因而微型光谱仪受到了极大的关注。目前光谱仪有多种光路结构,其中,光栅菲涅尔光谱仪,即在光谱仪结构中采用平面透射衍射光栅,会使测量光谱范围较窄<sup>[3]</sup>;采用凹面衍射成像系统的光谱仪成本较高、体积较大,其广泛应用有一定的局限性<sup>[4]</sup>; Czerny-Turner 光路结构不仅可以避免二次或多次衍射,而且便于光学元件的加工与调装,具有测量范围宽、结构简单、成本低廉等特点,被广泛应用于微型光谱仪中<sup>[5]</sup>。近年来,国内外的研究人员对微型光谱仪的设计和性能进行了大量的研究工作,浙江大学的夏果等人采用在探测器前加柱面透镜用于消除离轴像散,且采用了交叉性光路结构,虽然体积上实现了小型化,但其分辨力仅为 0.3 nm~0.4 nm<sup>[6]</sup>。浙江大学的刘康等人研制了一台双光路结构的微型光谱仪,中心波长分辨率为 1 nm,边缘波长分辨率为 2 nm<sup>[7]</sup>。徐明明等人基于对称式 Czerny-Turner 结构,提出使用两块平面光栅进行光谱分离的方法,从理论上设计了一种光谱分辨力优于 1 nm 光谱仪光学系统,但此光学系统的分辨力与现阶段的微型光谱仪的分辨力相差一个数量级,而且并未考虑小体积这一设计指标<sup>[8]</sup>。另外,美国海洋光学和上海复享公司所设计出的微型光谱仪分辨力往往也在 0.1 nm~0.9 nm 之间。显然上述光谱仪分辨力一般大于 0.3 nm,无法满足某些对于分辨力要求很高的领域,如在大气层中临边成像光谱探测时,由于受大气层中颗粒的种类和成分多及大气湿度等客观条件影响,对光谱仪的分辨力要求极高,分辨力可达 0.06 nm~0.08 nm<sup>[9-10]</sup>;在对钢铁中杂质元素的测定时,由于杂质元素的光谱特别复杂,谱线繁多,当其以基体元素存在时,往往会对其他元素的测定产生光谱干扰。这就要求光谱仪有很高的分辨力<sup>[11]</sup>;另外,小体积光谱仪易于携带,更方便公安部门现场检测毒品、执法部门现场检测工厂污水以及地质学家现场检测矿石成分等。

鉴于此,本文以满足外形尺寸、光谱分辨力、光谱范围、探测器(CCD)上光谱信号覆盖区域为条件,基于 Zemax 光学设计软件,通过选择合适的初始结构参数与评价函数自动优化准直镜、聚焦镜、柱透镜、

光栅以及 CCD 间倾角和距离,并在此基础上优化出 8 个光栅倾斜角度,从而设计了光谱范围为 820 nm~980 nm,分辨力可达到 0.05 nm,外型尺寸为 90 mm×130 mm×40 mm 的 Czerny-Turner 结构的微型光谱仪。

## 2 光路结构的设计及参数选择

### 2.1 Czerny-Turner(CT)光路结构

光路设计是微型光谱仪的重要组成部分,光谱分辨能力直接影响了微型光谱仪测量系统的性能。目前,平面光栅光谱仪绝大多数采用 Czerny-Turner 光路结构,其根本原因,首先在于此结构安排紧凑、体积小、成本低,其次在于该结构简单、光路对称且和谱面基本平直。另外,此结构的像质随离开中心距离增大而变坏的速度较其他反射成像结构要慢得多,因此能保证获得满意像质的较宽光谱<sup>[12]</sup>。该结构是由狭缝、球面反射准直镜、平面衍射光栅、球面反射聚焦镜和 CCD 组成<sup>[13-14]</sup>。入射光线由狭缝入射,经准直镜将光线准直后投向光栅上,光栅将不同波长的光线分开,最后由聚光镜将分开的光线聚焦照射到探测器 CCD 上,进行相应的信号采集与分析。CT 光路结构分为 M 型和交叉型,其中 M 型光路在光谱测量范围内的彗差和分辨力稳定性较好。

M 型 CT 光路结构如图 1 所示,准直镜和聚光镜的半径为  $r_1$  和  $r_2$ ,  $\alpha$  和  $\beta$  分别为主光线到达准直和聚光镜上的入射角度,  $H_1$  是准直镜中心到衍射光栅中心的竖直方向的距离,  $H_2$  是聚光镜中心到衍射光栅中心的竖直方向的距离,  $x$  是准直镜中心到衍射光栅中心水平方向的距离,  $f$  为聚光镜中心到光栅中心的水平距离。

M 型 CT 结构还可以分为对称型 CT 结构和非对称型 CT 结构,对称型 CT 结构需要满足条件:

$$H_1 = H_2, r_1 \neq r_2, \alpha = \beta。$$

这种结构如果要消除彗差的影响,在结构上还需要满足<sup>[15]</sup>:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{\cos i}{\cos \theta}。$$
 (1)

非对称型 CT 结构需要满足:

$$H_1 \neq H_2, r_1 = r_2。$$

这种结构如果要消除彗差的影响,在结构上还需要满足<sup>[15]</sup>:

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{\cos^3 i}{\cos^3 \theta} = \frac{\alpha}{\beta}。$$
 (2)

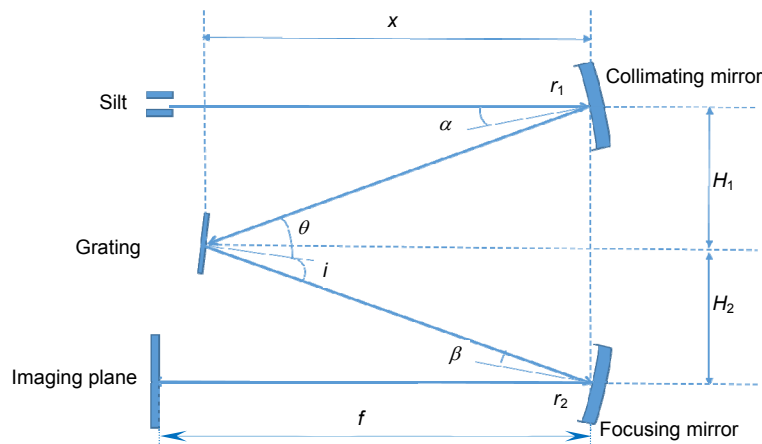


图 1 M 型 CT 光路结构图  
Fig. 1 The CT optical path structure of M-type

相对于对称式 CT 结构, 非对称式 CT 结构具有体积小、杂散光小和方便调节等优点<sup>[15]</sup>。因此 M 型 CT 结构中更适合采用非对称的 CT 光路结构。

2.2 光学元器件的选择与光路结构参量的计算

为了实现系统高分辨和微型化的设计目标, 便于与机械结构的尺寸相匹配, 确定的光谱仪设计指标为体积为 90 mm×130 mm×40 mm, 光谱测量范围为 820 nm~980 nm, 光谱分辨力为 0.05 nm。但是, 由于对光谱分辨力的要求过高, 所以只能先设计出光谱测量范围约为 880 nm~900 nm 的微型光谱仪, 然后通过优化并转动 8 个光栅倾斜角度, 使得光谱的测量范围达到 820 nm~980 nm, 从而实现设计指标。

光栅是光谱仪光路系统中的核心器件, 所以光栅的选择至关重要。在现代光谱仪中, 大多用闪耀光栅代替平面透射光栅, 主要是因为闪耀光栅可以实现单缝衍射中央最大值的位置从没有色散的零级光谱转移到其他有色散的光谱级上, 这样能量会更集中。闪耀光栅工作在其闪耀波长附近衍射效率最高, 闪耀波长与光谱测量范围满足以下关系式<sup>[16]</sup> :

$$\lambda_b = \lambda_1 + \frac{1}{4}(\lambda_2 - \lambda_1), \quad (3)$$

其中:  $\lambda_b$  为闪耀波长,  $\lambda_1, \lambda_2$  分别为测量光谱范围的起始波长和终止波长, 由式(3)可得闪耀波长  $\lambda_b = 885$  nm。所以, 本文选用 885 nm 的闪耀波长, 1200 line/mm 刻线数的光栅, 该光栅在 840 nm~1000 nm 处衍射效率最好, 可达到 90%, 在 1000 nm 往后的衍射效率开始低于 60%。另外, 考虑到机械调试, 我们确定光栅

的宽度  $X=11$  mm。

光谱分辨力是可分辨的最小波长差, 本文中的最小波长差为 0.05 nm。聚焦镜和准直镜的焦距和孔径决定了分辨力和球差。其中准直镜的焦距  $f$  和光谱分辨力  $\delta$  满足关系<sup>[16]</sup> :

$$f = \frac{a \cos i}{mn\delta\lambda}, \quad (4)$$

式中:  $a$  为入射狭缝的宽度,  $n$  为光栅刻线密度,  $m$  为衍射级次,  $i$  为光线在光栅上的入射角。取光栅衍射 +1 级光谱, 则  $m=1$ , 同时为了能够减小轴外像差, 入射角  $i$  应该尽可能的小, 在这里取  $\cos i = 1$ 。由式(4)可计算出  $f = 47.08$  mm。同时考虑到加工成本、像差影响以及参考反射镜曲率半径参照表, 故在本文中取两面反射镜的焦距为  $f_1 = f_2 = f = 52.0825$  mm, 相应的可以确定两面反射镜的曲率半径为  $r_1 = r_2 = 104.165$  mm。

在微型光谱仪光学设计过程中, 除了考虑彗差对成像质量的影响, 球差的存在也会使得光谱线扩散, 使得边缘不清晰, 会直接影响分辨力。所以为了能够将像差控制在合理的范围之内, 凹面反射镜的通光口径  $D$  与焦距  $f$  需要满足<sup>[17]</sup> :

$$D^4 \leq 256\lambda f^3. \quad (5)$$

取中心波长为  $\lambda=880$  nm, 由式(5)可得  $D \leq 42.2$  mm, 考虑到镀膜和光学加工的限制, 选取两面反射镜的有效通光口径为  $D_1 = D_2 = D = 40$  mm。

在本设计中, 采用的 CCD 的像元尺寸为  $S = 8 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ , 半径为  $r = 14.336$  mm, 像素为

2048×64，有效图像区域长度为 29.1 mm。由 CCD 的像元尺寸，可计算出空间频率：

$$\varepsilon = \frac{1 \text{ mm}}{(8 \times 2) \mu\text{m}} = 62.5 \text{ lp/mm}。$$

柱透镜主要用于消除光学系统产生的弧矢方向的像散，在光谱仪中柱透镜材料的选择上，考虑到生产成本，这里选择价格、生产难易程度和耐用性接近 N-BK7 的材料 BAC4。通过查看 Zemax 中 Glass Catalog 可知，BAC4 的价格仅为 N-BK7 的 1.4 倍，从玻璃代码 CR、FR、SR、AR 中可以看出 BAC4 具有较强的耐用性，BAC4 可以使用的波长范围为 250 nm~1550 nm，满足本文设计的微型光谱仪的波长范围。综上所述，高分辨力微型光谱仪的具体光学元件参数如表 1 所示。

### 3 光学系统模拟和优化

#### 3.1 Zemax 中系统模拟参数设置

系统的模拟参数除了光学元件本身的参数(两个球面反射镜、平面衍射光栅、柱透镜 CCD)外，光学

元件的位置坐标也需在 Zemax 中进行设置，各参数设计如表 2 所示。探测器选用纵向接受光线的像元长度为 2048×64 的 CCD。其他参数如主波长分别为 881 nm、889 nm、897 nm，系统的数值孔径为 0.1。

#### 3.2 系统优化结果

在完成光谱仪的光学设计分析和相关光学元件的相关参量后，使用 Zemax 光学设计软件对光路进行建模分析和优化。通过初始结构中的点列图发现，两波长的光线在 CCD 所成的高斯像面并非最佳像面，这是由于光路系统中主要存在彗差和像散的结果，用 Czerny-Turner 型结构来消彗差和像散，同时也可以通过在 CCD 探测器前加柱透镜来进一步消除像散。但只利用整体结构和加光学元件来消除像差是不够的，需要在利用评价函数对光学系统进行进一步优化。通过调整光路中各个光学元件的空间坐标和倾斜角，使得 880 nm~900 nm 的各个波长都能很好地会聚到 CCD 上，即找到最佳谱面的位置。光学系统优化后的光线模拟图如图 2 所示。

表 1 光学元件特征参量  
Table 1 Specification of the optical elements

Optical element	Parameters	Value
Collimating mirror	$f_1$	52.0825 mm
	$D_1$	40 mm
Condensing mirror	$f_2$	52.0825 mm
	$D_2$	40 mm
Diffraction grating	$\lambda_b$	870 nm
	$x$	11 mm
	$n$	1200 line/mm
Charge coupled device	$r$	14.336 mm
	$S$	8 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$

表 2 模拟参数  
Table 2 Design table of the simulation parameters

Optical element	Decenter Y/mm	Tilt about X/(°)
Entrance slit	0	7.600
Collimating mirror	10.904	34.000
Diffraction grating	19.992	3.000
Focusing mirror	37.000	30.808
Charge coupled device	37.997	15.346



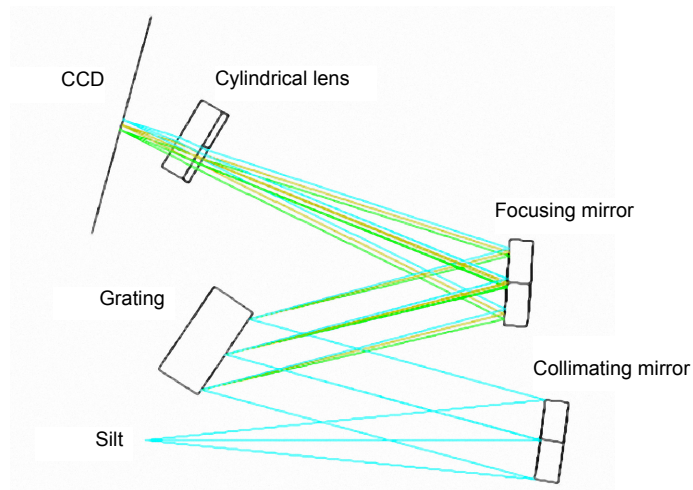


图 2 优化后的光路图

Fig. 2 The optimized optical path diagram

### 3.3 像差与结果分析

在光谱仪中,球差和彗差对光路系统的影响较大,需要对这两种像差进行分析和校正。球差的存在会使光谱线扩散,使边缘不清晰,直接影响分辨力。彗差对谱线轮廓的影响很严重,使光谱线单边扩散,不仅会降低仪器的分辨力,且会使谱线轮廓的极大值发生位移,有时还会产生假谱线。点列图如图 3 所示,整体 MTF 和 Spot Y 曲线如图 4 和图 5 所示,从点列图中可以看出像点规则且集中,说明在优化环节球差校正较好。理论上,凹面反射镜的反射率为 95%,平面光栅的衍射效率可达到 50%左右,由此计算出最低能传递效率为  $\eta \approx 45.125\%$ 。从系统传递函数图中可以看出,当空间频率为 60 lp/mm 时,传递函数效率可达到 50%~60%;ZEMAX 系统数据及指令数据中,系统的

体积为 90 mm×130 mm×40 mm,满足了系统的微型化设计要求。

图 3 为三个波长处与其值间隔 0.05 nm 波长的光斑点列图,可以看出每个波长的光斑明显分开,分辨力达到 0.05 nm。图 3(a)为 881.97 nm 和 881.92 nm 波长的点列图分开情况,图 3(b)为 889.82 nm 和 889.77 nm 波长的点列图分开情况,图 3(c)为 897.81 nm 和 897.76 nm 波长的点列图分开情况。

## 4 宽光谱的设计方法与分析

上文中所设计的微型光谱仪,虽然分辨力达到了 0.05 nm,但是所检测的光谱范围为 880 nm~900 nm,检测范围较窄。为了解决这一问题,在保证分辨力不变的情况下,只改变光栅的角度,使得光谱波段也随

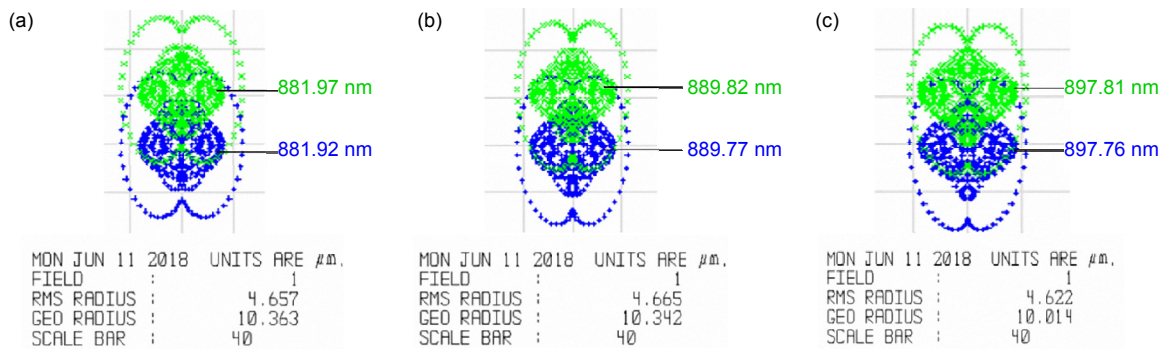


图 3 881 nm、889 nm、897 nm 的波长处的点列图分开情况

Fig. 3 The separated points at the wavelength of 881 nm, 889 nm and 897 nm

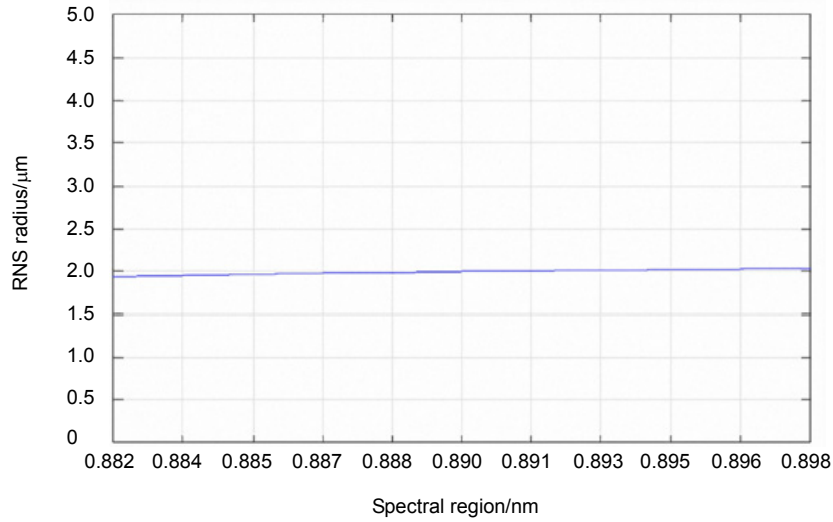


图 4 优化后的 spot Y 曲线  
Fig. 4 The optimized spot Y curve

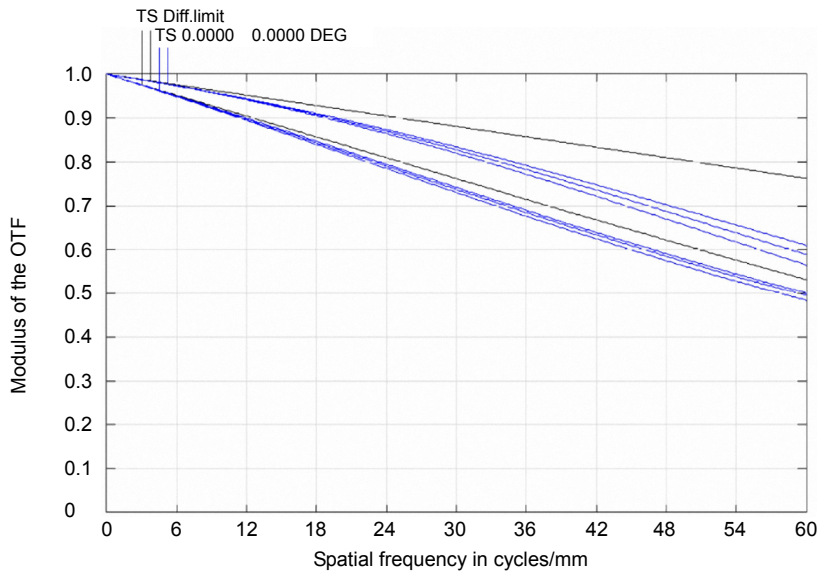


图 5 优化后的整体 MTF 曲线  
Fig. 5 The optimized MTF curves

之改变。经在 Zemax 进行仿真模拟可得结果，如表 3 所示。这样，光谱波段范围被间接地拉宽。从之前的光谱范围为 880 nm~900 nm 增宽到光谱范围为 820 nm~980 nm。从表 3 中的均方根半径(RMS)也可以看出，CCD 上光斑的能量比较强，MTF 在子午方向的曲线不低于 0.2，符合设计基本要求。除此之外，当继续改变光栅的转动角度，波段范围变为低于 820 nm 的波段范围(如 800 nm~820 nm)和高于 980 nm 的波段范围(如 980 nm~1000 nm)时，发现均方根半径高于 14

mm 并且逐渐增加，子午方向上的 MTF 曲线低于 0.1，弧矢方向上的 MTF 曲线低于 0.4，不符合设计要求。另外，该微型光谱仪受到高分辨设计要求(0.05 nm)的限制，光谱波段范围的间隔只能是 20 nm，因为当把光谱范围的间隔增大到 30 nm、40 nm 和 50 nm，发现像差会随着光谱范围的间隔的增大逐渐增大，从而使分辨率逐渐降低，间隔为 20 nm、30 nm、40 nm 和 50 nm 的点列图如图 6 所示。在实际加工中，最宽波段工作范围由光栅的机械旋转范围决定。

表 3 转动光栅后的实验结果

Table 3 Experimental results of rotating grating

Wavelength range/nm	Angle of grating rotation/(°)	Maximum of RMS radius/ $\mu\text{m}$	Transmission efficiency of optical system in MTF curve
820~840	31.55	3.7	0.27/0.68
840~860	32.30	6.1	0.51/0.82
860~880	33.15	3.8	0.67/0.82
880~900	34.00	2.1	0.68/0.79
900~920	34.85	2.3	0.67/0.71
920~940	35.63	3.3	0.32/0.67
940~960	36.55	4.2	0.49/0.71
960~980	34.40	4.7	0.42/0.48

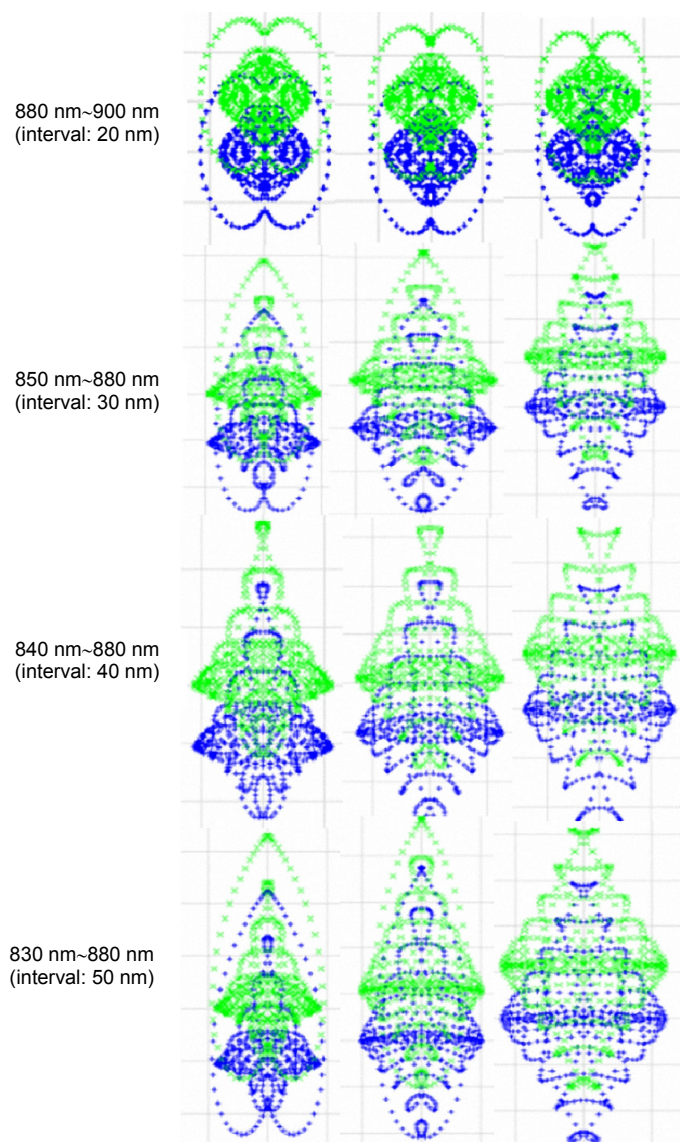


图 6 间隔为 20 nm, 30 nm, 40 nm 和 50 nm 的点列图

Fig. 6 Spot diagrams with intervals of 20 nm, 30 nm, 40 nm and 50 nm

## 5 结论

本文以微型光谱仪的光谱范围、尺寸和光谱分辨率等技术指标为依据,提出了基于平面衍射光栅分光的 C-T 结构方案。采用 Zemax 软件对光谱仪光学系统进行设计与优化。分析了该系统存在的像差光强等问题,通过逐步手动调节光栅倾斜,自动优化聚焦镜和 CCD 间的距离和倾角,完成设计超高分辨力光谱仪的任务。

最后,由于光谱范围较窄,在此光学设计基础上通过仅转动光栅的角度,使得波段范围逐渐变宽。该光学系统的结构尺寸小,分辨率高,光谱工作范围宽。其设计方法和结果可为新一代超高分辨力微型光谱仪的设计提供参考。

## 参考文献

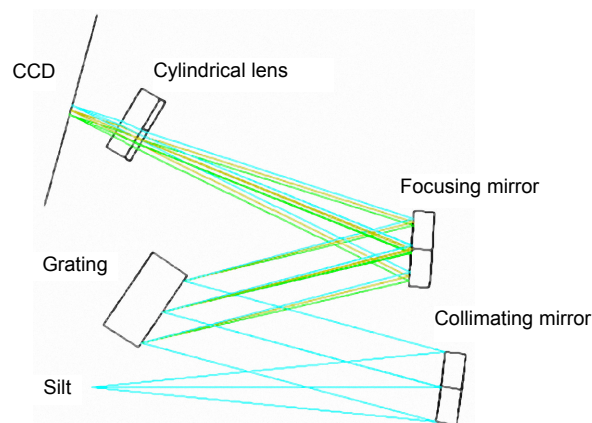
- [1] An Y, Liu Y, Sun Q, et al. Design and development of optical system for portable Raman spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(3): 0330001.  
安岩, 刘英, 孙强, 等. 便携式拉曼光谱仪的光学系统设计与研制[J]. *光学学报*, 2013, **33**(3): 0330001.
- [2] Martinez J L. Environmental pollution by antibiotics and by antibiotic resistance determinants[J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(11): 2893–2902.
- [3] Zhang W L, Tian F C, Zhao Z Z, et al. Interferogram correction of spatial heterodyne spectrometer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(5): 488–497.  
张文理, 田逢春, 赵贞贞, 等. 空间外差光谱仪的干涉图校正[J]. *光电工程*, 2017, **44**(5): 488–497.
- [4] Kong P, Tang Y G, Bayanheshig, et al. Optimization of broad-band flat-field holographic concave grating without astigmatism[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(2): 565–569.  
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.
- [5] Xue Q S, Wang S R, Lu F Q. Aberration correction of Czerny-Turner imaging spectrometer carried by satellite[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 35–40.  
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*, 2009, **29**(1): 35–40.
- [6] Xia G, Qu B X, Liu P, et al. Astigmatism-corrected miniature Czerny-turner spectrometer with freeform cylindrical lens[J]. *Chinese Optics Letter*, 2012, **10**(8): 081201.
- [7] Liu K, Yu F H. Double-beam miniature spectrometer system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(10): 1218–1223.  
刘康, 余飞鸿. 双光束微型光谱仪[J]. *光子学报*, 2013, **42**(10): 1218–1223.
- [8] Xu M M, Jiang Q W, Liu W Q, et al. An Improved method for optical system design and optimization of double grating spectrometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(1): 184–189.  
徐明明, 江庆五, 刘文清, 等. 一种新型双光栅光谱仪光学系统设计及优化[J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(1): 184–189.
- [9] Xue Q S, Wang S R, Li F T, et al. Limb imaging spectrometer for atmospheric remote sensing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(4): 823–830.  
薛庆生, 王淑荣, 李福田, 等. 用于大气遥感探测的临边成像光谱仪[J]. *光学精密工程*, 2010, **18**(4): 823–830.
- [10] Ye Q H, Jiang T, Dai H S, et al. Influence of thermal-vacuum environment on the recovered spectrum of spatial heterodyne spectrometer[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, **44**(7): 710–718.  
叶擎昊, 姜通, 代海山, 等. 热真空环境对空间外差光谱仪复原光谱的影响[J]. *光电工程*, 2017, **44**(7): 710–718.
- [11] Zhang Z Y, Ji H L. Application of high resolution ICP spectrometry in determination of impurity elements in niobium[J]. *Modern Instruments*, 1998(6): 29–30.  
张志樱, 纪红玲. 高分辨率 ICP 光谱仪在铌中杂质元素测定上的应用[J]. *现代仪器使用与维修*, 1998(6): 29–30.
- [12] Peng X F, Wei K H, Liu Y P, et al. Optical system design of Czerny-Turner spectrometer with high resolution[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(10): 1022003.  
彭雪峰, 魏凯华, 刘艳萍, 等. 高分辨率 Czerny-Turner 光谱仪光学系统设计[J]. *光子学报*, 2014, **43**(10): 1022003.
- [13] Lindblom P. Theory of the two-mirror plane-grating spectrograph[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1972, **62**(6): 756–762.
- [14] Zhong X, Zhang Y, Jin G. High performance Czerny-Turner imaging spectrometer with aberrations corrected by tilted lenses[J]. *Optics Communications*, 2015, **338**: 73–76.
- [15] Guo Z. Design the micro-Raman spectroscopy and study on data processing of Raman spectrum[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010: 21–22.  
郭忠. 微型拉曼光谱仪的结构设计与数据处理方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010: 21–22.
- [16] Lin Z, Fan S F. *Spectroinstrumentation*[M]. Beijing: China Machine Press, 1989.  
林中, 范世福. *光谱仪器学*[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [17] Ye B Q, Wang F, Sui C H, et al. Optical design of spectrum observation system in ZnO temperature sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, **38**(7): 0716001.  
叶必卿, 汪飞, 隋成华, 等. ZnO 温度传感器光谱监测系统的设计[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0716001.



# Design of optical system of miniature spectrometer for ultrahigh-resolution

Wang Xianjun, Long Yaxue, Zheng Haiyan, Guo Hanming\*

School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China



The optimized optical path diagram

**Overview:** The spectrum can reflect the molecular structure information of substances and plays an important role in the fields of biology, chemistry, pharmaceutical materials, food industry and geological exploration. With the development of science and technology, a large number of frontier disciplines cross, infiltrate and fuse. A series of requirements that include wide spectrum, high resolution and miniaturization of spectrometer are proposed, thus the micro spectrometer has been concerned tremendously. Nowadays, the spectrometer has many light path structures. Czerny-Turner light path structure not only avoids the secondary or multiple diffraction, but also facilitates the optical element processing and the loading. It has a wide measuring range, simple structure, low cost and so on, so it is widely used in micro spectrometer. In recent years, researchers at home and abroad have done a lot of researches on the design and performance of micro-spectrometer. However, the resolution of spectrometer is generally more than 0.3 nm, which cannot meet some areas with high resolution. When researchers detect imaging spectrum in the atmosphere in the edge, the spectrometer shall have a high resolution of 0.06 nm~0.08 nm, owing to the kinds of particles in the atmosphere and multi-component and the atmospheric humidity. In the determination of impurity elements in steel, the determination of other elements is caused by spectral interference when it exists in the matrix elements, owing to the complexity of impurity element spectrum and various spectral lines. In this case, a high resolution of the spectrometer is highly desired. In addition, the small-volume spectrometer is portable, making it more convenient for police departments to detect drugs, law enforcement departments to detect factory sewage and geologists to detect mineral composition on the spot.

We used Zemax (optical design software) to choose the initial structure parameters and evaluation function to automatically optimize angle and distance of focus lens, cylindrical lens and CCD to design an optical system of spectrometer of Czerny-Turner structure, whose resolution is better than 0.05 nm. Its numerical aperture is 0.1, and the volume of the system is 90 mm×130 mm×40 mm. On this basis, eight grating slanting angles were optimized, and the spectral resolution of the micro-spectrometer is better than 0.05 nm, while the band range reaches 820 nm~980 nm. The spectrometer has the characteristics of high resolution, wide spectrum and small volume.

**Citation:** Wang X J, Long Y X, Zheng H Y, *et al.* Design of optical system of miniature spectrometer for ultrahigh-resolution[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2018, **45**(10): 180228

Supported by National Key R&D Program of China (2016YFF0101603)

\* E-mail: hmguo@usst.edu.cn