

doi: 10.3788/gzxb20174606.0622004

微型光谱仪结构参量的可调节冗余量研究

郑海燕, 龙亚雪, 谈梦科, 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: 为了探究 Czerny-Turner(CT)光路结构在装配过程中各个光学元件偏离理论光学设计参量时对光谱仪光学性能的影响, 建立数学物理模型还原 Zemax 设计的非对称 CT 结构光路, 在不影响光谱仪分辨率的条件下, 调节 CT 结构中的各元件, 得到各元件的可调节冗余量。结果表明, 准直镜和衍射光栅偏转角度可调节范围分别为 $\pm 0.19^\circ$ 和 $\pm 0.17^\circ$; 聚光镜和 CCD 的位置可调节范围都为 ± 0.12 mm。以上四个变量的可调节冗余量最小, 对光谱仪最终分辨率影响较大。该研究对 CT 结构中各光学元件机械调节机构的设计具有参考意义。

关键词: 光谱仪; Czerny-Turner 结构; 光学设计; 分辨率; Zemax

中图分类号: TN202

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)06-0622004-8

Adjustable Redundancy of the Micro Spectrometer Structure Parameter

ZHENG Hai-yan, TAN Meng-ke, LONG Ya-xue, GUO Han-ming

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

Abstract: In order to investigate the influence of the optical elements of Czerny-Turner (CT) optical path structure on the optical properties of the spectrometer when the optical elements are deviated from the theoretical design parameters, the mathematical model was established to successfully restore the asymmetric CT optical path structure designed by Zemax, under the condition of unaffacting the spectrometer resolution, the components of adjustable redundancy was got. The results show that the adjustable range of the deflection angle of the collimating mirror and the diffraction grating is ± 0.19 and ± 0.17 degrees, and the adjustable range of the condenser and the CCD is ± 0.12 mm. The adjustable range of the above four variables is the smallest, which has a great influence on the final resolution of the spectrometer. The research provides the references for the mechanical adjustment mechanism of each optical element in CT structure.

Key words: Spectrometer; Czerny-Turner structure; Optical design; Resolution ratio; Zemax

OCIS Codes: 220.4830; 200.1130; 200.4560; 350.4600

0 引言

光谱能够反映物质分子结构、成分等丰富的信息, 已经在生物、化学、医药材料、食品工业以及地质勘探等领域起着重要作用^[1-2]。微型光谱仪具有体积小、质量轻、可集成化、可批量生产以及成本低廉等优点, 是光谱仪发展的一个重要趋势。此外它还具有二次开发性能, 可以利用微型光谱仪来进一步制造喇曼光谱仪等分析仪器^[3-4]。目前光谱仪光路结构有多种, 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^[5]; 采用凹面光栅的光谱仪成本较高、体积较大, 其广泛应用有一定局限性^[6]; Czerny-Turner(CT)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, 具有测量光

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2016YFF0101603)和上海市教育委员会科研创新项目(No. 13SG47)资助

第一作者: 郑海燕(1993-)女, 硕士研究生, 主要研究方向为光学设计。Email: haiyanzheng628@163.com

导师(通讯作者): 郭汉明(1977-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为超分辨光学显微成像和光谱技术。Email: hmguo@usst.edu.cn

收稿日期: 2017-01-03; 录用日期: 2017-03-02

<http://www.photon.ac.cn>

谱范围宽、结构简单、成本低廉等特点,被广泛应用于微型光谱仪^[7]. CT 结构又分为交叉型和 M 型两种光路,其中 M 型光路在光谱测量范围内的彗差和分辨率稳定性较好^[8]. CT 结构仅由两块球面镜和一块平面闪耀光栅组成,其中光栅作为色散元件,两个球面反射镜分别作为准直镜和成像镜^[9-10]. 由于很多应用中光谱仪对分辨率要求很高^[11],其内部各元件的位置、角度参量都需要严格控制,从而使得高性能光谱仪的生产加工难度极大. 因此,研究并且明确所设计光谱仪结构各个元件的可调节冗余量有着重要的实际意义.

本文针对 Zemax 设计的非对称 CT 结构光谱仪,建立 CT 结构光谱仪光路的数学物理模型^[12-13],还原 Zemax 设计的光路. 然后基于该模型,模拟仿真分析每个元件的微小调节对光谱仪分辨率的影响,确定使 Zemax 设计的光谱仪结构能够调整至分辨率最佳的位置,并且在不影响光谱仪分辨率的条件下,得出各元件的可调节冗余量. 该工作为光谱仪的设计加工在灵活性上提供了可靠的参考.

1 光谱仪 CT 结构的数学模型

主要考虑 CCD 上不同波长光斑垂直方向(CCD 像元排列的方向)分开的情况,因此只计算 yoz 平面的光路. 如图 1 所示,以狭缝处为坐标原点 O , M_1 为球面准直镜, Gr 为衍射光栅, M_2 为球面聚光镜. r_1 和 r_2 分别为准直镜和聚光镜的曲率半径, A 、 B 、 C 为中心光线和两边缘光线入射到准直镜上的交点, D 、 E 、 F 、 I 、 H 、 G 和 C_0 点分别为光线入射到光栅、聚光镜和 CCD 上的交点,同时以中心光线的入射点 E 点和 H 点作为光栅和聚光镜的位置确定点即为 E_0 点和 H_0 点. i_B 、 i_E 和 i_H 分别为各元件上 B 、 E 和 H 点的光线入射角, θ_E 为光栅上 E 点处的光线衍射角, θ_H 为聚光镜上 H 点处的法线与水平方向的夹角. α 为狭缝处边缘光线与水平方向的夹角即为孔径角, φ_1 、 φ_2 和 φ_3 分别为准直镜、光栅和聚光镜的偏转角. 系统的物方孔径角及各元件的多个参量都与 Zemax 中的设计参量相匹配.

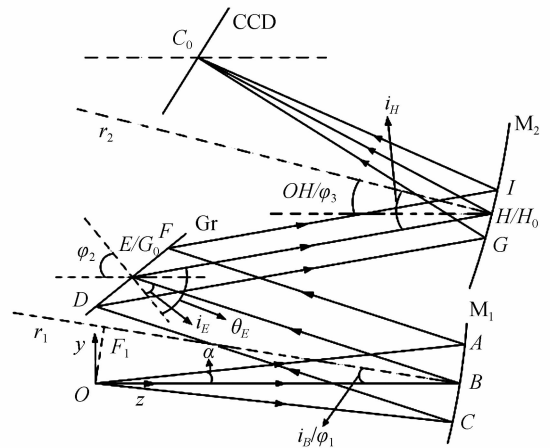


图 1 CT 结构

Fig. 1 Czerny-Turner(CT) structure

系统的物方孔径角及各元件的多个参量都与 Zemax 中的设计参量相匹配.

1) 确定准直镜处的光线情况

为使准直镜出射平行光,狭缝应位于准直镜光轴上的焦点处^[14-15]. 已知准直镜圆心坐标 $O_1(y_{O_1}, z_{O_1})$ 为

$$\begin{cases} y_{O_1} = r_1 \sin \varphi_1 \\ z_{O_1} = r_1 / (2 \cos \varphi_1) - r_1 \cos \varphi_1 \end{cases} \quad (1)$$

且准直镜 M_1 上中心位置点 $B(y_B, z_B)$ 满足

$$\begin{cases} (\vec{OB} \cdot \vec{e}_z) / |\vec{OB}| = \cos \alpha' \\ (y_B - y_{O_1})^2 + (z_B - z_{O_1})^2 = r_1^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中, α' 为狭缝处任意光线与水平方向的夹角, 中心位置处 $\alpha' = 0$. 再由

$$(\vec{OB} \cdot \vec{O_1B}) / (|\vec{OB}| \cdot |\vec{O_1B}|) = \cos i_B \quad (3)$$

可得中心位置处的光线入射角 $i_B = \varphi_1$. 同理只需将式中 α' 取已定的最大孔径角区间 $[\alpha, -\alpha]$ 中任一值即可求出准直镜上全部光线位置和入射角.

2) 确定光栅处的光线情况

衍射光栅 Gr 中心位置 $G_0(y_{G_0}, z_{G_0})$ 和偏转角度 φ_2 给定, 由反射原理可知, M_1 中光线出射角等于入射角, 故由光栅平面方程和余弦公式可求出光栅上的点 $E(y_E, z_E)$

$$\begin{cases} y_E = \tan(90 - \varphi_2)(z_E - z_{G_0}) + y_{G_0} \\ (\vec{O_1B} \cdot \vec{EB}) / (|\vec{O_1B}| \cdot |\vec{EB}|) = \cos i_B \end{cases} \quad (4)$$

再由式(5)

$$(\vec{EB} \cdot \vec{e}_z) / |\vec{EB}| = \cos(\varphi_2 - i_E) \quad (5)$$

求出 E 点处光线入射角 i_E . 通过给定中心波长 λ , 光栅级次 d 和光栅方程: $d(\sin i_E + \sin \theta_E) = m\lambda (m=1)$ 可求出光线衍射角 θ_E , 则光栅上其它光线的位置和出射、入射角度同理可得.

3) 确定聚光镜处光线情况

聚光镜 M_2 的中心位置 (y_{H_0}, z_{H_0}) 和偏转角度 φ_3 确定, 则聚光镜圆心 $O_2 (y_{O_2}, z_{O_2})$ 为

$$\begin{cases} y_{O_2} = y_{H_0} + r_2 \sin \varphi_3 \\ z_{O_2} = z_{H_0} - r_2 \cos \varphi_3 \end{cases} \quad (6)$$

聚光镜上的点 H 满足

$$\begin{cases} y_H = \tan(\theta_E - \varphi_2)(z_H - z_E) + y_E \\ (y_H - y_{O_2})^2 + (z_H - z_{O_2})^2 = r_2^2 \end{cases} \quad (7)$$

再由式(8)

$$(\overrightarrow{EH} \cdot \overrightarrow{O_2H}) / |\overrightarrow{EH} \cdot \overrightarrow{O_2H}| = \cos i_H \quad (8)$$

求出点 H 处光线的入射角 i_H , 其它光线的入射角同理可得.

对于聚光镜 M_2 上的出射光线, 先通过余弦公式计算 M_2 上各经聚光镜圆心的出射光线和水平位置的夹角, 如点 H 处的角 o_H

$$\cos o_H = (\overrightarrow{O_2H} \cdot \mathbf{e}_z) / |\overrightarrow{O_2H}| \quad (9)$$

则点 H 处的出射光线方程为

$$y = -\tan(i_H + o_H)(z - z_H) + y_H \quad (10)$$

同理将各点处的出射光线方程求出. 通过最小二乘法对所得不同波长不同角度的交点进行直线拟合^[16], 并把该直线作为系统最佳 CCD 位置, 从而得出 CT 结构中 CCD 的最佳位置和偏转角度.

2 调整结构参量至最佳位置

针对 Zemax 中的初始结构参量(见表 1)将光学原理和代数运算结合起来进行数值计算, 建立匹配的数学模型.

表 1 CT 结构的初始参量
Table 1 Initial parameters of CT structural

Parameter	Value
NA of optical probe	0.1
Wavelength range/nm	790~1 027
Laser wavelength/nm	780±0.5
Radius of collimating mirror/mm	110
Radius of collecting mirror/mm	130
Grating of groove spacing/(lp·mm ⁻¹)	1/1 200
Angle of collimating mirror	9°
Angle of diffraction grating	39°
Angle of collecting mirror	14°
Position of collimating mirror(y,z)/mm	(0,55.686)
Position of diffraction grating(y,z)/mm	(17.082,3.114)
Position of collecting mirror(y,z)/mm	(26.7,60.704)

由光学成像原理可知, 狭缝需位于准直镜的焦平面上, 以狭缝为原点则准直镜位置确定. 调节过程中, 由于本实验的初始结构参量在 Zemax 中已是最优的结果, 因此在原结构所得结果离预期相差不大的情况下调节越少的元件变量越容易找到最佳结果. 由于准直镜和光栅的偏转角度和位置直接影响后面所有元件的位置和偏转角度, 影响较大, 故在调节 CT 光路结构时, 准直镜和衍射光栅固定不变. 由于 CCD 的位置随聚光镜位置确定而确定, 调节聚光镜与调节 CCD 的效果相同, 因此微调时只需调节 CCD 的位置与角度即可.

实验中, 光谱范围 $82 \sim 3\,002 \text{ cm}^{-1}$ ($790 \sim 1\,027 \text{ nm}$) 中每隔 4 个波数取一个波长, 再以不同角度计算出不同波长光线的光路, 从而计算出每个波长在 CCD 上的光斑范围和光斑在 y 方向的最大、最小值(即 y_{\max} 和 y_{\min}). CCD 面上从上到下光波长逐渐减小, 将两个相邻波长中较短波长 λ_2 光斑最上点减去较长波长 λ_1 的光

斑最下点,计算出两个光斑的分开程度 $d = y_{2\max} - y_{1\min}$, d 小于 0 为完全分开(图 2(a)),大于 0 为重合(图 2(b)),以此来确定满足 4 cm^{-1} 分辨率的最佳位置.

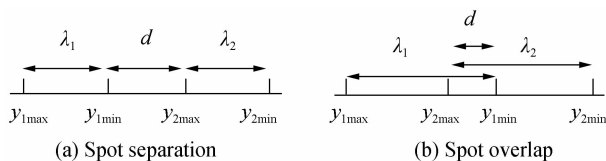


图 2 光斑分析图

Fig. 2 Spot analysis diagram

1) CCD 倾斜角不变,调节其位置.

初始结构中拟合出的平面作为初始 CCD 的位置,找出 CCD 的中心位置,并在 z 轴方向进行调节, z 越大则越接近聚光镜方向,由图 3 可知 CCD 位置在调节范围内短波长分辨率良好;对于长波长 d 值在 $z = 15.717 \text{ mm}$ 时最小,因此调节 CCD 的位置 y 不变, $z = 15.717 \text{ mm}$.

2) CCD 位置不变,调节其偏转角度.

由图 4 可知,CCD 偏转角度在调节范围内短波长分辨率良好;长波长分辨率在 CCD 偏转角度为 32° 时相对最好,此时 d 重合程度最小.

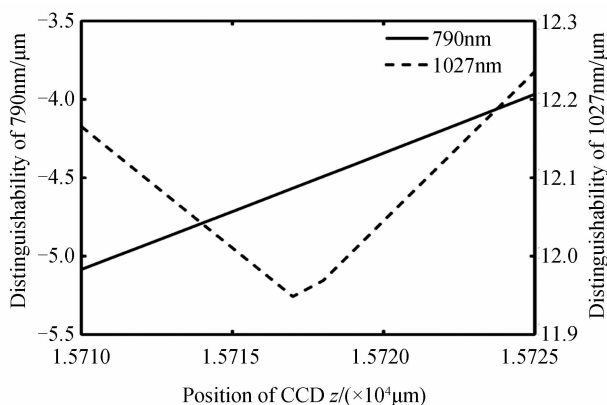


图 3 光谱范围两端分辨率随 CCD 位置变化

Fig. 3 On both ends of the spectrum resolution CCD position change

3) 确定 CCD 位置与角度,观察全波段效果.

由图 5 可知,虽然从波长 $0.971 \mu\text{m}$ 开始相邻光斑距离大于 0 并逐渐增大,到 $1.027 \mu\text{m}$ 时距离为 $d = 11.95 \mu\text{m}$,但是每个波长的光斑宽度也从 $38.18 \mu\text{m}$ 到 $63.86 \mu\text{m}$ 逐渐增大,且光斑的主要能量位置也越来越偏向一边,如图 6.

由此可知, $0.971 \sim 1.027 \mu\text{m}$ 波长在 CCD 上的光斑在确保能量集中部分能分开的前提下允许有重合部分.

将 CCD 上每个波长的光斑分成 150 个小间隔,计算每个间隔中的光线数目,以光线数目的多少来确定每个光斑能量较为集中的区域位置,如图 7,可见与 Zemax 中光斑点列图的能量分布相吻合.

计算每个波长在 CCD 上的光斑主要能量区域在垂直方向的最大、最小值(即 y_{\max} 和 y_{\min}),由于 CCD 面上接收的光线从上到下长波长逐渐减小,因此将两个相邻波长中较短波长 λ_2 光斑能量最大区域最上点减去较长波长 λ_1 的光斑能量最大区域最下点,计算出两个光斑的分开程度 $d = y_{2\max} - y_{1\min}$,所得 d 值如图 8,可知 $0.790 \sim 1.027 \mu\text{m}$ 全波段的能量较大区域都能很好地分开,即分辨率良好.

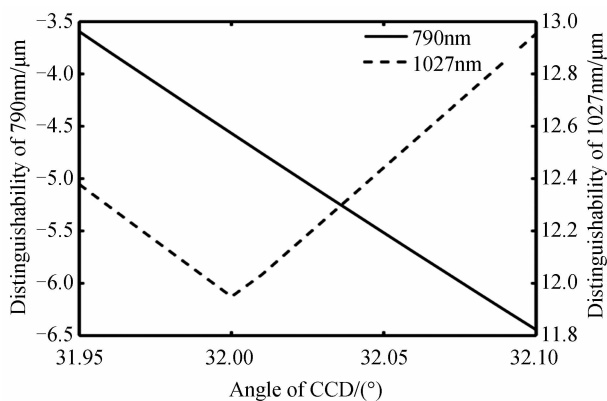


图 4 光谱范围两端分辨率随 CCD 偏转角度变化

Fig. 4 On both ends of the spectrum resolution change with CCD deflection Angle

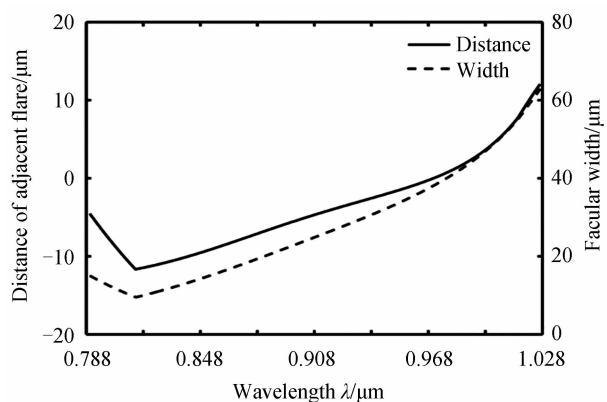


图 5 光谱范围内光斑距离和宽度的变化

Fig. 5 Variation of range and width of light spot in spectral range

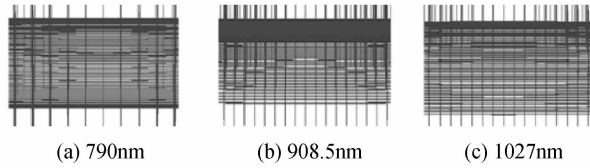


图6 不同波长光斑的主要能量分布

Fig. 6 Main energy distribution of different wavelength facula

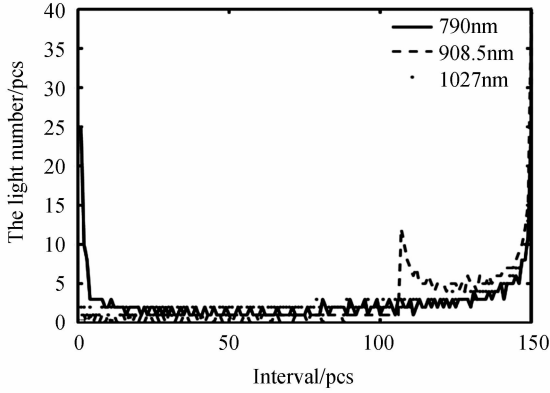


图7 三种波长光斑的能量分布

Fig. 7 Energy distribution of three wavelength spot

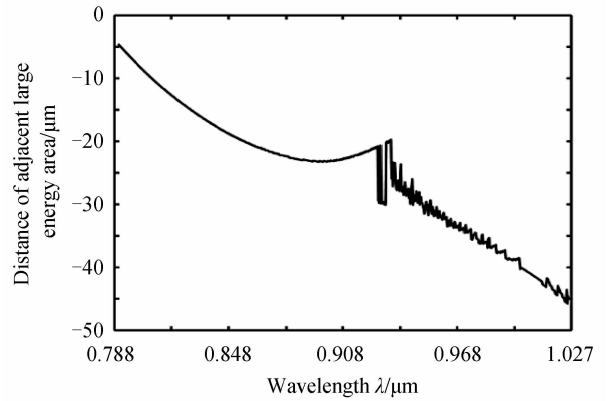


图8 整个波段的能量集中区域分开距离

Fig. 8 Energy separation distance of whole band

综上所述,可确定该CT结构中其它元件的最佳位置和偏转角度,表1中的参量不变,CCD的最佳位置为 $(y,z)=(60.5\text{ mm},15.717\text{ mm})$,最佳偏转角度为 32° .此时在光谱波数范围 $80\sim 3\ 002\text{ cm}^{-1}$ 的全波段光谱分辨率优于 4 cm^{-1} .

3 各元件的可调节冗余量

在光谱仪正常加工中误差不可避免,因此在光学设计时需检测光谱仪分辨率允许情况下的误差范围,使得在生产和使用中更加灵活.分别调节准直镜、光栅、聚光镜和CCD四个元件,调节每个元件的过程中固定其它三个元件.以每个光斑主要能量区域能完全分开且不溢出元件为标准,确保整个波段的分辨率都能达到 4 cm^{-1} .

在调节过程中,会出现全波段光斑主要能量分开程度比最佳结构的分开程度要大的情况,这是因为每个波长的光斑主要能量区域的位置和大小会随着元件的变动而变动,如图5所示.因此有些情况下该区域的大小较小和较偏离中心位置会造成相邻两个波长的主要能量区域的分开距离增大,但同时光斑重合度也较大,因此确保整体波段的相邻光斑分开程度最好即为最佳结构.

3.1 调节准直镜

1) 固定准直镜位置,调节偏转角度.

由图9可知,准直镜偏转角度在 $8.70^\circ\sim 9.08^\circ$ 中,全波段主要能量区域的分开程度逐渐递增,即分开距离越来越小.准直镜偏转角在 8.7° 之前和 9.08° 之后全波段主要能量区域的最大值随着偏转角度变化会出现突然距离变化剧烈的情况,表示准直镜偏转角度在 8.7° 之前和 9.08° 之后在CCD上会出现光线溢出.因此CCD上全波段光斑主要能量区域分开且不溢出的情况下,准直镜偏转角度的可调范围为 $8.70^\circ\sim 9.08^\circ$.

2) 固定准直镜偏转角度,调节其位置.

对于准直镜,最佳光谱仪结构中其偏转角度为 9° 左右,因此相较于调节 y 轴方向,调节 z 方向的位置可以慢慢观察准直镜的变化对整个波段分辨率结果的影响,调节其它元件同理.

由图10可知,准直镜位于 $55.146\sim 56.586\text{ mm}$ 时,全波段主要能量区域分开程度逐渐递减,即分开距离越来越大. 55.286 mm 之后距离小于0, 56.586 mm 之后位置再增加. 56.586 mm 之后全波段中的主要能量区域的最大值出现突然增大的情况,即造成CCD上光线溢出.类似于准直镜角度变化分析,得出准直镜位置可调范围为 $55.286\sim 56.586\text{ mm}$.

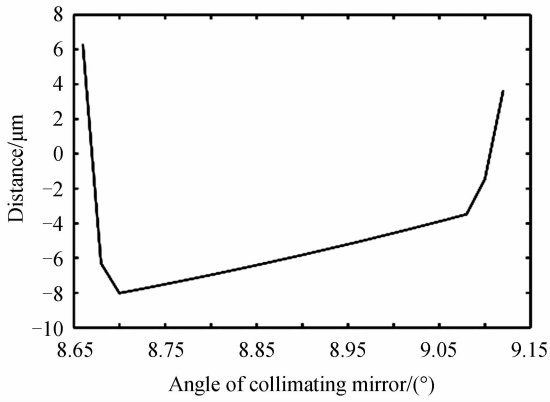


图9 主要能量区域分开程度随准直镜角度变化
Fig. 9 Variation of separation degree of main energy region with collimating mirror angle

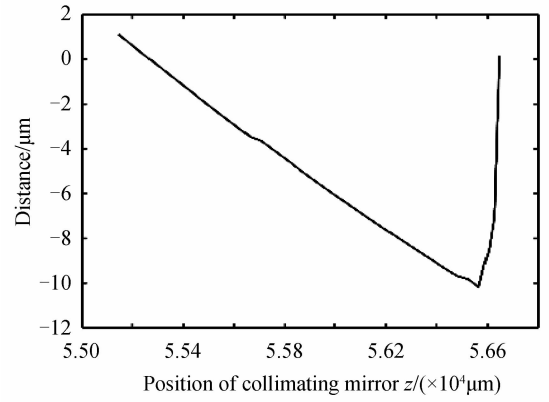


图10 主要能量区域分开程度随准直镜位置变化
Fig. 10 Variation of main energy region separation with collimating mirror position

3.2 调节衍射光栅

1) 固定衍射光栅位置, 调节偏转角度.

同准直镜角度变化分析, 由图 11 可知光栅角度的可调范围为 $38.87^{\circ} \sim 39.22^{\circ}$.

2) 固定光栅偏转角度, 调节其位置.

同准直镜位置变化分析, 由图 12 可知, 光栅位置可调范围为 $2.604 \sim 4.004$ mm.

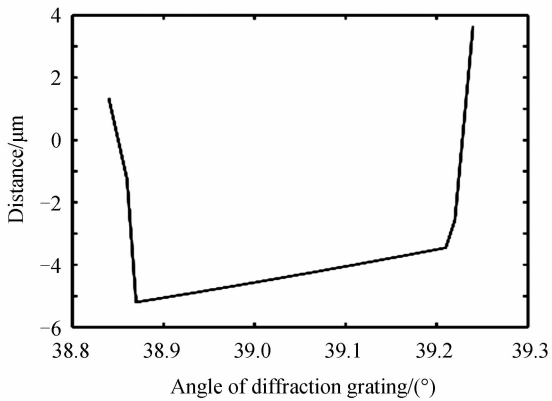


图11 主要能量区域分开程度随光栅角度变化
Fig. 11 Variation of separation degree of main energy region with grating angle

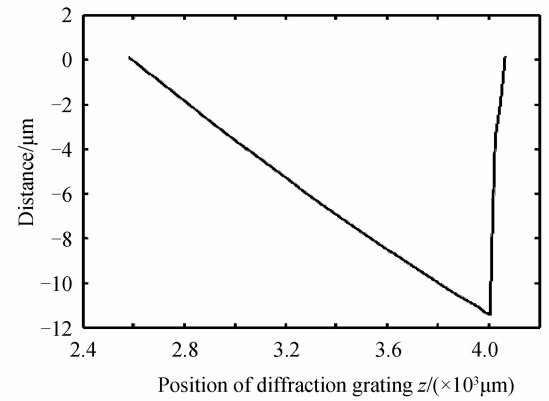


图12 主要能量区域分开程度随光栅位置变化
Fig. 12 Variation of main energy region separation with grating position

3.3 调节聚光镜

1) 固定聚光镜位置, 调节偏转角度.

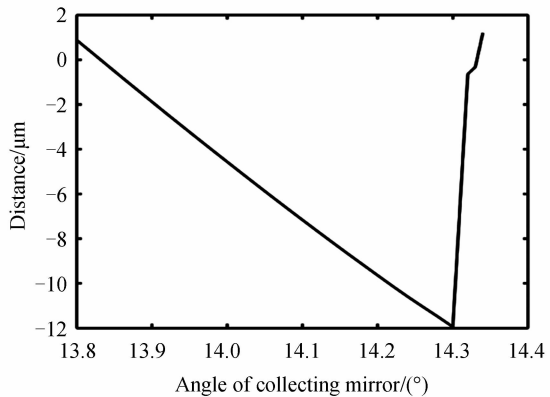


图13 主要能量区域分开程度随聚光镜角度变化
Fig. 13 Variation of separation degree of main energy region with condenser angle

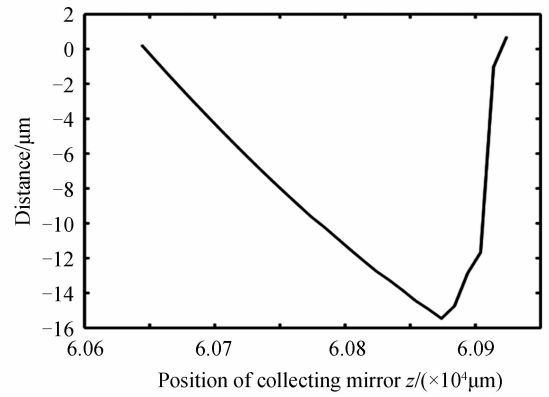


图14 主要能量区域分开程度随聚光镜位置变化
Fig. 14 Variation of main energy region separation with condenser position

由图 13 可知,聚光镜偏转角度的可调范围为 $13.84^{\circ}\sim 14.30^{\circ}$.

2) 固定聚光镜偏转角度,调节其位置.

由图 14 可知,聚光镜位置可调范围为 $60.654\sim 60.904$ mm.

3.4 调节 CCD

1) 固定 CCD 位置,调节 CCD 偏转角度

由图 15 可得 CCD 偏转角度可调范围为 $31.8^{\circ}\sim 33.3^{\circ}$.

2) 固定 CCD 偏转角度,调节其位置.

由图 16 可知,CCD 位置在 $15.527\sim 15.777$ mm 中,全波段主要能量区域的分开程度是逐渐递增的,分开距离越来越小, 15.767 mm 之后距离大于 0. 同理,CCD 位置可调范围为 $15.527\sim 15.767$ mm.

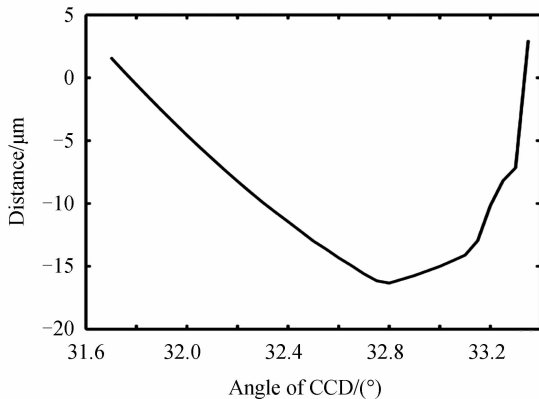


图 15 主要能量区域分开程度随 CCD 角度变化

Fig. 15 Variation of main energy zone separation degree with CCD angle

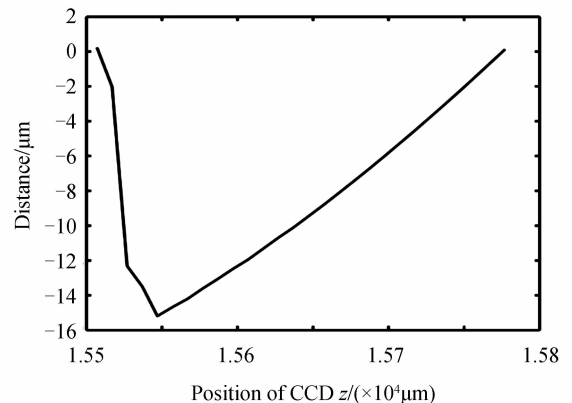


图 16 主要能量区域分开程度随 CCD 位置变化

Fig. 16 Variation of main energy zone separation with CCD position

4 结论

建立 CT 结构光谱仪的数学物理模型,分析了各个光学元件偏离理论光学设计参量时对光谱仪光学性能的影响,找到了各元件的可调节冗余量.准直镜的位置和偏转角度可调范围为 ± 0.65 mm 和 $\pm 0.19^{\circ}$;衍射光栅的位置和偏转角度可调范围为 ± 0.7 mm 和 $\pm 0.17^{\circ}$;聚光镜的位置和偏转角度可调范围为 ± 0.12 mm 和 $\pm 0.23^{\circ}$;CCD 的位置和偏转角度可调范围为 ± 0.12 mm 和 $\pm 0.75^{\circ}$. 其中聚光镜、CCD 的位置和准直镜、光栅的偏转角度可调冗余量最小,即对最终分辨率影响较大. 基于上述特点及各元件的可调节冗余量,可以给各元件设计更少自由度的调节机构.

本文方法适用于其它 CT 结构光谱仪参量的可调节冗余量分析,能够为光谱仪的生产加工、元件调节提供参考,为光谱仪的低成本、高效率生产奠定了良好的基础.

参考文献

- [1] AN Yan, LIU Ying, SUN Qiang, *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. 便携式喇曼光谱仪的光学系统设计及研制[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] 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.
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.
- [4] LI Hong-sheng, LIAO Yan-biao. Fiber slit spectrometer MTF measurement by using grating ghost line and Fourier analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(3): 770-774.
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.
- [5] 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.
- [6] KONG Peng, TANG Yu-guo, 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.
- [7] XUE Qing-sheng, WANG Shu-rong, LU Feng-qin, *et al.* 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.
- [8] CHEN Tan-xuan, YANG Huai-dong, CHEN Ke-xin, *et al.* Coma and resolution in wide spectral region Czerny-Turner spectrometer[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, **30**(6): 1692-1696.
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**(6): 1692-1696.
- [9] LINDBLOM P. Theory of two-mirror plane-grating spectrograph[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1972, **62**: 756-762.
- [10] ZHONG X, ZHANG Y, JIN G. High performance Czerny-Turner imaging spectrometer with aberrations corrected by tilted lenses[J]. *Optics Communications*, 2015, **338**(1): 73-76.
- [11] SHAFER A B, MEGILL L R, DROPPLEMAN L. Optimization of the Czerny-Turner spectrometer[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1964, **54**(7): 879-887.
- [12] KONG Peng, BAYANHESHING, LI Wen-hao, *et al.* Optimization of double-grating flat-field holographic concave grating spectrograph[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(2): 0205001.
孔鹏, 巴音贺希格, 李文昊, 等. 双光栅平场全息凹面光栅光谱仪的优化设计[J]. 光学学报, 2011, **31**(2): 0205001.
- [13] JOSEPH R. Optimizing Czerny-Turner spectrographs: a comparison between analytic theory and ray tracing [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1969, **59**(9): 1189-1196.
- [14] 郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 354.
- [15] BAYANHESHING, LI Tao-tao, PAN Ming-zhong, *et al.* Tunable spatial heterodyne spectroscopy with grating-mirror structure[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(12): 3295-3302.
巴音贺希格, 李涛涛, 潘明忠, 等. 光栅-平面镜型可调式空间外差光谱仪[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(12): 3295-3302.
- [16] SHUKLA R P, SINHA A K, *et al.* A simple method of calibration for multichannel spectrograph using charge-coupled device(CCD) as a detector for Raman spectroscopy[J]. *Journal of Optics*, 2004, **33**(2): 87-107.