

文章编号 1004-924X(2011)06-1265-07

# 满足消像散条件的 Czerny-Turner 光谱仪光路的防干涉设计

陈芳\*, 徐彭梅

(北京空间机电研究所, 北京 100086)

**摘要:**理论分析了准直镜和聚焦镜采用球面面型的 Czerny-Turner 光谱仪系统中由消像散条件引起系统发生光路与结构件干涉的现象。为了在设计阶段就克服这种干涉问题,提出了 Czerny-Turner 结构的防干涉设计条件。结合消像散条件及光路结构防干涉条件,总结出了 Czerny-Turner 光谱仪消像散优化和结构优化的设计步骤,提出了准直镜入射角  $\theta_c$  和聚焦镜入射角  $\theta_f$  的选定准则。对根据总结的设计步骤及入射角选定准则设计的光谱仪系统进行了光线追迹法验证,发现其既能满足消像散条件又不会发生光路与结构件的干涉现象,能满足航天遥感对其宽谱段、高分辨率的要求。

**关键词:**光栅光谱仪; Czerny-Turner 光学系统; 消像散; 干涉

**中图分类号:** V243.5; TH744.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111906.1265

## Optical structure optimization of broadband astigmatism-free Czerny-Turner spectrometer

CHEN Fang\*, XU Peng-mei

(Beijing Institution of Space Mechanics and Electricity, Beijing 100086, China)

\* Corresponding author, E-mail: happystraw@126.com

**Abstract:** The interference between the optical paths in a broadband astigmatism-free Czerny-Turner spectrometer which uses spherical optics and a plane grating was introduced theoretically. To eliminate the interference, the zeroth-order and first-order astigmatism-free conditions of the Czerny-Turner spectrometer was researched and several situations of optical path interference satisfied the astigmatism-free conditions were analyzed. Based on the astigmatism-free conditions and avoidance conditions of optical structure interference, the selection principles of the incidence angles  $\theta_c$  and  $\theta_f$  were deduced, and the optimization approach was summarized. Then, the optical system of Czerny-Turner spectrometer which will be loaded on a spacecraft was designed according to the method whose selection principle was verified by using ray-tracing method. The results show that the obtained imaging quality has a good spectral resolution, which validates that the Czerny-Turner spectrometer can satisfy the requirements both for eliminating astigmatism and for avoiding optical structure interference. In

conclusion, the method can help the spectrometer more compact and more efficient.

**Key words:** grating spectrometer; Czerny-Turner optical system; astigmatism-free; interference

## 1 引言

近年来, Czerny-Turner 光栅光谱仪由于其结构简单、性能可靠、能进行多组分检测且具有高灵敏度等优点,在航天遥感领域得到广泛应用。例如美国航天局(NASA)、欧空局(ESA)已成功发射了多个光栅光谱仪载荷(SCIAMACHY、OMI等),进行天气和气候预测以及大气环境监测<sup>[1-2]</sup>。随着技术的发展,光谱仪朝着高分辨率、宽谱段、高稳定性的方向发展,这对光谱仪系统设计提出了更高的要求。

Czerny-Turner 光栅光谱仪包括入射狭缝、准直镜、反射光栅、聚焦镜和探测器 5 个部件。入射光经狭缝进入光学系统,经过准直镜后入射到光栅,经光栅分光后通过聚焦镜聚焦到线阵探测器上。由于系统采用离轴光,轴外光线入射时,球面镜由于子午面和弧矢面的曲率不同,子午像和弧矢像不重合,系统存在像散,而且光栅分光还将导致不同波长的像散值不同,差别较大,因此在光学设计过程中需对整个波长范围校正像散<sup>[4]</sup>。

对宽谱段 Czerny-Turner 系统消像散的方法有多种,例如在入射狭缝处加补偿镜<sup>[5-6]</sup>,准直镜和聚焦镜采用非球面面型<sup>[7]</sup>或者超环面面型<sup>[8]</sup>,采用柱面光栅<sup>[9]</sup>等等,但这些方法均增加了元件的加工或装调的复杂程度。Dane R. Austin 等学者<sup>[10-13]</sup>不在改变 Czerny-Turner 系统基本构造的前提下,针对采用球面面型的准直镜和聚焦镜,提出了在工作波长范围内消除像散的零阶条件和一阶条件,通过优化各光学元件间的距离、角度,很好地改善了光谱仪的成像质量。但是 Dane R. Austin 等人关于消像散的分析没有考虑 Czerny-Turner 光路干涉的问题,当准直镜入射角和聚焦镜入射角选择不合理时,满足消像散条件的结构将引起光路干涉,影响光学系统质量。为了快速方便地选定合理的准直镜入射角和聚焦镜入射角,使得设计出的满足消像散条件的 Czerny-Turner 结构不发生光路干涉,本文在 Dane R. Austin 等人研究的基础上,对 Czerny-Turner 光路结构特点进行了分析,提出了光路的防干涉条

件,并结合消像散条件及光路防干涉条件,提出了准直镜入射角和聚焦镜入射角的选定准则,并将其应用于实际的光谱仪设计。

## 2 Czerny-Turner 光谱仪消像散原理

通过对 Czerny-Turner 系统的光路分析(光路结构如图 1 所示),Dane R. Austin 等人提出了消除像散的零阶条件和一阶条件,其消像散条件如下<sup>[10]</sup>。

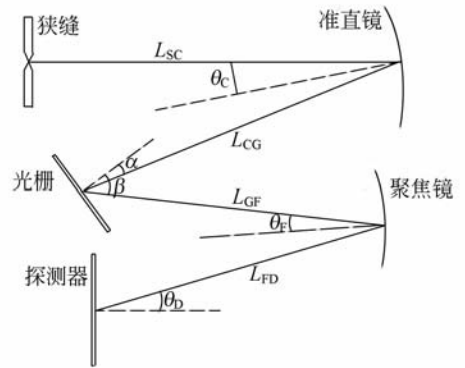


图 1 Czerny-Turner 光谱仪光学系统图

Fig. 1 Optical structure of Czerny-Turner spectrometer

图中  $L_{sc}$  为狭缝到准直镜的距离,  $\theta_c$  为准直镜入射角,  $L_{cg}$  为准直镜到光栅的距离,  $\alpha$  为光栅入射角,  $\beta$  为衍射角,  $L_{gf}$  为光栅到聚焦镜的距离,  $\theta_f$  为聚焦镜入射角,  $L_{fd}$  为聚焦镜到探测器的距离,  $\theta_b$  为探测器的偏角。

### 2.1 消像散的零阶条件

在 Czerny-Turner 系统中,准直镜和聚焦镜都会引起像散,系统的子午像  $S_T$  和弧矢像  $S_S$  的位置公式<sup>[4]</sup>为:

$$S_T = \frac{R_C R_F L_{sc}}{2L_{sc}(R_C \sec \theta_f + R_F \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} \sec \theta_c) - R_C R_F \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta}}, \quad (1)$$

$$S_S = \frac{R_C R_F L_{sc}}{2L_{sc}(R_C \cos \theta_f + R_F \cos \theta_c) - R_C R_F}. \quad (2)$$

为消除像散需满足  $S_T = S_S, L_{FD} = S_T$ 。

### 2.2 消像散的一阶条件

消像散的零阶条件是针对于某一波长的,对于一个宽波段的光谱仪,系统结构仅满足此条件还不能消除所有波长处的像散。由于有光栅的色散作用,对于不同波长  $\alpha$ ,衍射角  $\beta$  不同,也会导致  $\theta_F, L_{FD}$  随波长变化,如  $dS_T/d\beta$  与  $dS_S/d\beta$  相等,则在不同波长处,谱线的像散相同。系统的  $L_{FD}, S_T$  和  $S_S$  关于  $\beta$  的一阶微分公式<sup>[10]</sup>为:

$$\frac{dL_{FD}}{d\beta} = \tan \theta_D (L_{GF} + L_{FD} - \frac{2L_{GF}L_{FD}}{R_F \cos \theta_F}) - L_{GF} \tan \theta_F, \tag{3}$$

$$\frac{dS_S}{d\beta} = \frac{\partial S_S}{\partial \theta_F} \frac{d\theta_F}{d\beta} = (1 - \frac{L_{GF}}{R_F \cos \theta_F}) \cdot \frac{2S_S L_{SC} R_C \sin \theta_F}{2L_{SC} (R_C \cos \theta_F + R_F \cos \theta_C) - R_C R_F} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \frac{dS_T}{d\beta} = \frac{\partial S_T}{\partial \beta} + \frac{\partial S_T}{\partial \theta_F} \frac{d\theta_F}{d\beta} = & \frac{-2S_T R_F (2L_{SC} \sec \theta_C - R_C) \cos^2 \alpha \tan \beta \sec^2 \beta}{2L_{SC} (R_C \sec \theta_F + R_F \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} \sec \theta_C) - R_C R_F \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta}} + \\ & - 2S_T L_{SC} R_C \sec \theta_F \tan \theta_F (1 - \frac{L_{GF}}{R_F \cos \theta_F}) \\ & \frac{2L_{SC} (R_C \sec \theta_F + R_F \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta} \sec \theta_C) - R_C R_F \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \beta}}, \end{aligned} \tag{5}$$

消像散的一阶条件:  $dS_T/d\beta = dS_S/d\beta, dS_S/d\beta = dL_{FD}/d\beta$ 。

Dane R. Austin 等人认为系统光谱分辨率确定了光栅常数  $d$ 、聚焦镜的曲率半径  $R_F$  和  $R_C$ 、衍射级次  $m$ 、光栅入射角  $\alpha$  和衍射角  $\beta$  的值,准直镜到光栅的距离  $L_{CG}$  对成像质量影响很小,一般为  $R_C/2$ 。设定准直镜入射角  $\theta_C$  和聚焦镜入射角  $\theta_F$ ,根据零阶条件条件可以解出狭缝到准直镜的距离  $L_{SC}$  和聚焦镜到探测器的距离  $L_{FD}$ ,根据一阶条件可以解出光栅到聚焦镜的距离  $L_{GF}$  和探测器的偏角  $\theta_D$ <sup>[10]</sup>。

### 3 满足消像散条件的 Czerny-Turner 光路结构的防干涉设计

Dane R. Austin 等人事先选定了  $\theta_C$  和  $\theta_F$ ,将其代入消像散条件对其他参数进行优化,但是当选择了不合适的  $\theta_C$  和  $\theta_F$  时,求解出的满足消像

散条件的其他参数,可能会引起光路干涉。为了在进行消像散设计之前就避免光路干涉,本文在对满足消像散条件的 Czerny-Turner 光路发生干涉时的结构分析的基础上,提出了  $\theta_C$  和  $\theta_F$  的选定准则(根据消像散条件计算得到的结构参数,一般  $L_{SC} < L_{CG}, L_{GF} < L_{FD}$ ,本文将仅针对这种情况进行分析)。

Czerny-Turner 光路干涉分为两个部分:第一部分是狭缝与光栅之间光线与结构件发生干涉,如图 2 所示;第二部分是光栅与探测器之间光线与结构件发生干涉,如图 3 所示。结构中聚焦镜的曲率半径  $R_F$  和准直镜的曲率半径  $R_C$ 、光栅入射角  $\alpha$  和衍射角  $\beta$  的值(此处取工作波长范围内最小波长的衍射角),准直镜到光栅的距离,光栅的长度均根据光谱仪的应用范围确定为已知值。由狭缝入射的光采用上光线  $O_1C_1$ 、主光线  $O_1C_2$  和下光线  $O_1C_3$  表示,它们与准直镜、光栅、聚焦镜的交点分别为  $C_1, C_2, C_3, G_1, G_2, G_3, F_1, F_2, F_3$ ,在探测器上的成像点为  $O_2$ 。

#### 3.1 狭缝与光栅之间光路的防干涉条件

以狭缝为坐标原点  $O_1, X_1$  轴沿主光线  $O_1C_2$ ,建立直角坐标系  $X_1Y_1$ ,如图 2 所示。

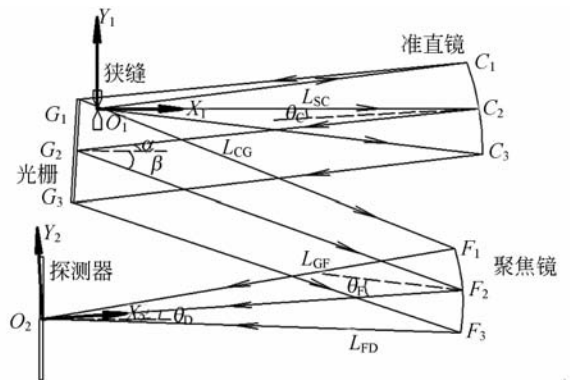


图 2 狭缝与光栅之间光路干涉

Fig. 2 Interference of optical path between slot and grating

根据光路几何关系可以建立边缘光线  $C_1G_1$  在坐标系  $X_1Y_1$  中的方程,分析发现当  $C_1G_1$  与  $Y_1$  轴的交点处于  $Y_1$  轴的正值方,则系统必定发生干涉,为避免干涉,须使  $C_1G_1$  与  $Y_1$  轴的交点小于 0,而  $C_1G_1$  与  $Y_1$  轴的交点由式(6)给出:

$$Y_C = \frac{L}{2} \sin r_C + \frac{L}{2} \cos r_C \tan 2\theta_C - L_{SC} \tan 2\theta_C, \tag{6}$$

式中  $r_C = \pi/2 - 2\theta_C - \alpha, L_{SC}$  可由消像散的零阶条件确

定,即狭缝与光栅之间光路防干涉条件为: $Y_C < 0$ 。

### 3.2 光栅与探测器之间光路的防干涉条件

对第二种干涉情况进行分析,此时将探测器上的成像点(工作波长范围内最小波长的成像点)为坐标原点  $O_2$ ,  $X_2$  轴沿主光线  $O_2F_2$ , 建立直角坐标系  $X_2Y_2$ , 如图 3。

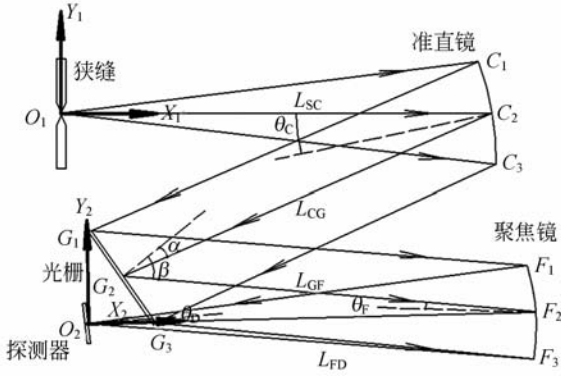


图 3 光栅与探测器之间光路干涉

Fig. 3 Interference of optical path between grating and detector

边缘光线  $F_1O_2$  与光栅存在交点,则系统必定发生干涉,设在  $X_2Y_2$  坐标系中光栅上  $G_3$  的坐标为  $(X_{G_3}, Y_{G_3})$ , 聚焦镜上  $F_1$  的坐标为  $(X_{F_1}, Y_{F_1})$ , 当  $Y_F = Y_{F_1} X_{G_2} / X_{F_1} - Y_{G_3} < 0$  时,可避开干涉。根据光路几何关系,  $G_3$  的坐标由式(7)给出:

$$\begin{cases} X_{G_3} = L_{FD} - L_{GF} \cos 2\theta_F + \frac{L}{2} \cos r_F \\ Y_{G_3} = L_{GF} \sin 2\theta_F - \frac{L}{2} \sin r_F \end{cases}, \quad (7)$$

$F_1(X_{F_1}, Y_{F_1})$  为直线  $G_1F_1$  与聚焦镜圆面的交点,其坐标可由式(8)求得:

$$\begin{cases} Y_{F_1} = -\tan 2\theta_F (X_{F_1} - L_{FD} + L_{GF} \cos 2\theta_F + \frac{L}{2} \cos r_F) \\ + L_{GF} \sin 2\theta_F + \frac{L}{2} \sin r_F \\ (X_{F_1} - L_{FD} + R_F \cos \theta_F)^2 + (Y_{F_1} - R_F \sin \theta_F)^2 = R_F^2 \end{cases}. \quad (8)$$

式中  $r_F = \pi/2 - 2\theta_F - \beta$ ,  $L_{GF}$ 、 $L_{FD}$  可由消像散条件确定,即光栅与探测器之间光路防干涉条件为: $Y_F < 0$ 。

### 3.3 满足消像散条件的 Czerny-Turner 光路结构防干涉条件及设计步骤

综合以上分析,满足消像散条件的 Czerny-Turner 光路避免结构干涉的条件为:

$$\begin{cases} \text{避免光路干涉的条件: } Y_C < 0, Y_F < 0 \\ \text{消像散零阶条件: } S_T = S_S = L_{FD} \\ \text{消像散一阶条件: } \frac{dS_T}{d\beta} = \frac{dS_S}{d\beta}, \frac{dS_S}{d\beta} = \frac{dL_{FD}}{d\beta} \end{cases}, \quad (9)$$

因此,可根据(9)式确定如下优化步骤,设计出无光路干涉的满足消像散条件的 Czerny-Turner 结构:(1)根据消像散的零阶和一阶条件确定  $L_{SC}$ ,  $L_{GF}$ ,  $L_{FD}$  与  $\theta_C$  和  $\theta_F$  的关系;(2)将  $L_{SC}$ ,  $L_{GF}$ ,  $L_{FD}$  代入避免光路干涉的条件,即可得到和的两个不等式;(3)以  $\theta_F$  为自变量,计算得到既满足消像散条件又可避免光路干涉的  $\theta_C$  的取值范围,可画出  $\theta_C$  的取值范围关于  $\theta_F$  的曲线;(4)根据第 3 步的结果选定  $\theta_F$  和  $\theta_C$ , 代入  $L_{SC}$ ,  $L_{GF}$ ,  $L_{FD}$  的表达式中得到消像散的结构参数;(5)将计算得到的光学初始结构参数输入光学设计软件 ZEMAX, 对系统进一步优化。

## 4 方法验证

为了验证该设计方法的正确性与优势,以一航天领域 Czerny-Turner 光谱仪为例,对其进行了分析验证。所选 Czerny-Turner 光谱仪设计工作波长为  $1.2 \sim 1.9 \mu\text{m}$ , 光谱分辨率要求  $3 \text{ nm}$ , 探测器像元数为 512, 像元尺寸为  $50 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$ , 其他已确定的基本参数如表 1 所示。

表 1 光谱仪光学设计参数表

Tab. 1 Design parameters of grating spectrometer

设计参数	参数值
入射狭缝直径	$50 \mu\text{m}$
光栅常数	$d = 300 \text{ l/mm}$
准直镜半径 $R_C$	$100 \text{ mm}$
聚焦镜半径 $R_F$	$120 \text{ mm}$
光栅入射角 $\alpha$	$5^\circ$
中心波长	$1.6 \mu\text{m}$
准直镜到光栅的距离 $L_{CG}$	$50 \text{ mm}$
光栅长度 $L$	$10 \text{ mm}$

根据 3.3 中的设计步骤,运用表 1 中已知的光谱仪参数,可以根据公式(9)得到  $\theta_C$  的取值范围关于  $\theta_F$  的曲线,如图 4 所示。曲线 ABC 与曲线 EFG 所围的中间阴影区域即为针对该光谱仪的满足消像散条件的光路结构防干涉的  $\theta_C$  和  $\theta_F$  的取值范围。当选取的  $\theta_C$  和  $\theta_F$  值对应的点落在

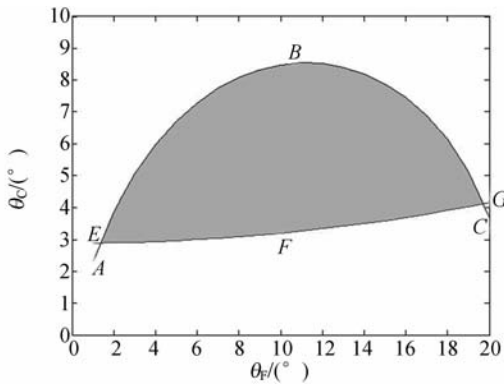


图 4  $\theta_C$  和  $\theta_F$  的取值范围

Fig. 4 Constraint area of  $\theta_C$  and  $\theta_F$

阴影区域以外则设计的满足消像散条件的 Czerny-Turner 结构光谱仪必然发生光路干涉。为了验证设计方法的正确性,根据图 4 的结果选定了如表 2 所示的阴影区域内外的 3 组  $\theta_C$  和  $\theta_F$  值,利用光线追迹法对其光路进行了分析,其满足消像散条件的光路结构如图 5 所示。

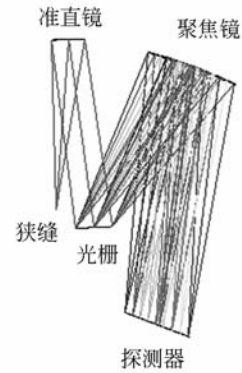
表 2 阴影区域内外的 3 组  $\theta_C$  和  $\theta_F$  值

Tab. 2 Values of inside and out of shadow area

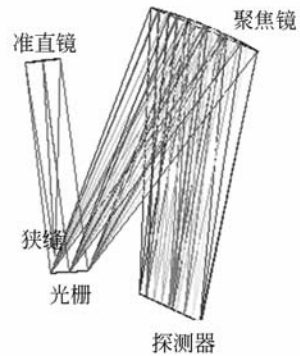
组别	$\theta_C / (^\circ)$	$\theta_F / (^\circ)$
1	6	12
2	2	12
3	10	12

从图 5 可以发现,组 1 在避免干涉的取值范围内,消像散优化后的光路结构没有干涉,如图 5. a 所示,而组 2 和组 3 则都不在取值范围内,消像散优化后的光路结构均存在干涉,组 2 是狭缝阻挡了部分光线而组 3 则是光栅阻挡了部分光线,这与第 3 节的理论分析是相符的。

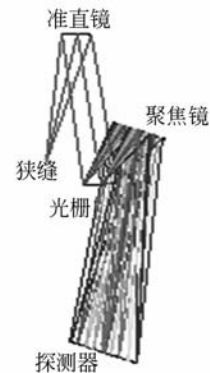
从图 4、图 5 的分析中,可以发现对于一个已确定好表 1 所示的光谱仪参数的特定 Czerny-Turner 结构光谱仪,在满足消像散条件的情况下要想避免光路干涉,对于  $\theta_C$  和  $\theta_F$  值均有一定的限制。本文 3.3 提供的设计步骤及计算公式为  $\theta_C$  和  $\theta_F$  的选定指明了方向,提供了选择范围而不用再采用尝试与经验的方法去决定  $\theta_C$  和  $\theta_F$  的取值,为满足消像散条件的 Czerny-Turner 结构光谱仪的光路防干涉设计提供了快速解决方案。



(a)  $\theta_C = 6^\circ, \theta_F = 12^\circ$



(b)  $\theta_C = 2^\circ, \theta_F = 12^\circ$



(c)  $\theta_C = 10^\circ, \theta_F = 12^\circ$

图 5 不同  $\theta_C$  和  $\theta_F$  值消像散优化后的光路结构

Fig. 5 Astigmatism-free optical structures based on different  $\theta_C$  and  $\theta_F$

### 5 结 论

本文对基于准直镜和聚焦镜采用球面面型的 Czerny-Turner 光谱仪系统的消像散条件带来的

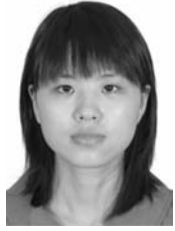
光路干涉问题进行了深入的分析。首先,从光路结构入手,对 Czerny-Turner 系统出现的光路与结构件干涉的现象进行了理论分析,提出了 Czerny-Turner 结构的防干涉设计条件。其次,结合消像散条件及避免光路结构干涉条件,总结出了 Czerny-Turner 光谱仪消像散优化和结构优化的设计步骤,提出了准直镜入射角  $\theta_C$  和聚焦镜入射角  $\theta_F$  的选定准则,最终为满足消像散条件的 Cz-

erny-Turner 结构光谱仪的防干涉设计提供了一种快速实用的设计方法。本文根据所得的设计方法,以一用于航天领域 Czerny-Turner 光谱仪为例,通过光线追迹法分别对满足与不满足入射角选定准则的光谱仪系统进行了验证,验证结果表明,满足入射角选定准则的光谱仪系统不会发生光路干涉现象,而不满足入射角选定准则的光谱仪系统则存在光路干涉现象。

## 参考文献:

- [1] MAGER R, FRICKE W, JOHN P, *et al.*. New-Generation of hyperspectral remote sensing instrument[J]. *SPIE*, 1997, 3106: 84-94.
- [2] DE JOHAN V, GIJSBERTUS H J, VAN DEN OORD. Ozone monitoring instrument (OMI) [J]. *SPIE*, 2002, 4480: 315-325.
- [3] CZERNY M, TURNER A F. Astigmatism in mirror spectrometers[J]. *Z. Physik.*, 1930, 61(11-12): 792-797.
- [4] 黄振宇. 基于线阵 CCD 的小型光谱仪光度特性研究[J]. *应用光学*, 2007, 28(5): 564-568.  
HUANG ZH Y. Research on photometric performance of a miniature spectrometer based on linear CCD [J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28: 564-568.
- [5] GOTO M, MORITA S. Spatial distribution measurement of atomic radiation with an astigmatism-corrected Czerny-Turner-type spectrometer in the Large Helical Device[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, 77: 10F124.
- [6] 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.  
XUE Q SH, WANG SH R, LI F T, *et al.*. Limb imaging spectrometer for atmospheric remote sensing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 823-830.
- [7] ROSENDAHL G R. Contributions to optics of mirror systems and gratings with oblique incidence. III. some applications[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1962, 52: 412-415.
- [8] SHAFER A B. Correcting for astigmatism in the Czerny-Turner spectrometer and spectrograph[J]. *Appl. Opt.*, 1967, 6: 159-160.
- [9] DALTON M L. Astigmatism compensation in the Czerny-Turner spectrometer[J]. *Appl. Opt.*, 1966(5): 1121-1123.
- [10] AUSTIN D A, WITTING T, WALMSLEY L A. Broadband astigmatism-free Czerny-Turner imaging spectrometer using spherical mirrors[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(19): 3846-3853.
- [11] 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*, 1970, 3(3): 206-210.
- [12] MCDOWELL M. Design of Czerny-Turner spectrographs using divergent grating illumination[J]. *Opt. Acta (Lond.)*, 1975, 22: 473-475.
- [13] 唐玉国, 宋楠, 巴音贺希格, 等. 中阶梯光栅光谱仪的光学设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(9): 1989-1995.  
TANG Y G, SONG N, BAYANHESHIG, *et al.*. Optical design of cross-dispersed echelle spectrograph[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 1989-1995.

## 作者简介:



陈芳(1985—),女,湖南岳阳人,工程师,2006年,2008年于清华大学分别获得学士、硕士学位,主要从事航天遥感器光学系统设计及性能分析的研究。  
E-mail: happystraw@126.com



徐彭梅(1966—),女,上海人,研究员,主要从事航天遥感器总体设计及研究。  
E-mail: xupengmei@yahoo.com.cn

## ●下期预告

## 单一超窄线宽激光器的多气体检测系统设计

陈霄,隋青美,苗飞,王静

(山东大学控制科学与工程学院,山东济南250061)

基于超窄线宽半导体激光器的波长扫描和光谱调制技术,设计了一种高精度多组分气体实时在线检测系统。系统采用单一超窄线宽可调谐半导体激光器作为光源,设计了新型串联式气室结构,通过三角波信号对光源光谱进行调制,并结合时分复用和空分复用技术,利用超窄线宽激光的特性实现了一氧化碳、二氧化碳、甲烷多组分气体浓度的同时多点检测。实验结果表明,一氧化碳、二氧化碳、甲烷多组分气体浓度测量线性相关度为0.99,最大相对误差 $<2\%$ ;逐次充入一定体积甲烷、二氧化碳、一氧化碳气体,动态响应时间均 $<10\text{ s}$ ;长时间稳定性实验,多组分气体浓度最大波动 $<0.02\%$ 。该系统精确度高、稳定性好,具有较好的动态响应特性,可用于电力变压器故障气体实时在线监测。