第36卷，第7期
2016年7月

光谱学与光谱分析
Spectroscopy and Spectral Analysis

Vol. 36, No. 7, pp2287-2290
July, 2016

# 基于Dyson同心系统的光线折叠式成像光谱仪优化设计

刘玉娟[1]，王成明[1]，林　君[1*]，崔继承[2]，张天瑜[1*]，仲志成[1*]

1. 吉林大学仪器科学与电气工程学院，吉林 长春　130026
2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春　130033

**摘　要**　基于Dyson同心光学系统的凹面光栅成像光谱仪具有像差小、孔径高、结构简单紧凑的优点，同心结构要求光谱仪子系统的物面和像面必须重合为一个平面，且物点和像点之间距离非常小。现有的焦平面探测技术和装配技术难以满足理论设计要求。为了解决实际中物点和探测器的安置问题，对传统Dyson同心光谱仪光学系统进行了改进设计，通过在成像光束中引入离轴反射镜实现像面位置的转移。结果表明：改进后的光学系统由于成像光束发生折叠，物面和像面成功分离，且改进后系统的全波段像差得到更合理的分配。

**关键词**　成像光谱仪；同心；Dyson；光学设计
**中图分类号**：TH744　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.3964/j.issn.1000-0593(2016)07-2287-04

## 引　言

成像光谱技术是20世纪80年代起源于遥感领域的新型分析技术，由于同时采集探测目标的空间信息和光谱信息，可同时实现目标的空间“定位”分析和物质成分“定性”分析，代表了先进遥感探测技术的发展方向之一，在军事目标识别、环境监测、地质普查等遥感应用领域具有广泛的应用[1-6]。近年来，随着遥感探测应用中对仪器高性能和小型化需求的不断提高，基于常规光栅色散结构的传统成像光谱仪由于存在数值孔径与焦距相互限制的矛盾，一般以牺牲仪器尺寸指标为代价提高信噪比，难以同时实现高分辨率、高信噪比、小尺寸以及低成本的要求[6-9]。

基于Dyson同心光学结构的凹面光栅同心光谱仪系统仅由一个平凸透镜和一个凹面光栅组成，系统中所有球面的球心重合为一点。该同心设计使系统具有像差小、孔径高、结构简单紧凑的优点，成为现代高性能的高光谱遥感仪器光谱仪子系统光学结构的首要选择之一，在遥感探测、环境监控、医学诊断治疗等诸多领域具有广阔的应用前景[10-16]。

光学设计是光谱仪器设计的首要环节，也是仪器满足其应用要求的关键[17]。凹面光栅同心光谱仪系统作为高光谱遥感仪的核心部分，直接决定了系统的光学性能。因此，合理的光学设计是实现高光谱遥感仪高光学性能的前提。对凹面光栅同心光谱仪，为了实现其光学“同心”特性，其物面和像面理论上重合为一个平面，且物点和像点之间距离非常小。在现有制造技术下，这种特性大大提高了前置望远镜头和后端焦平面探测器的设计及加工装配的难度，在一定程度上限制了凹面光栅同心光谱仪在民用领域的发展与应用。鉴于此，本文在凹面光栅同心光谱仪的光学设计中采用光线偏折的方法将物面与像面分离，经优化设计，有效的解决了物像面安置问题，凹面光栅同心光谱仪的像差也得到了更加合理的优化。

## 1　凹面光栅同心光谱仪光学系统

如图1所示，基于Dyson同心光学结构的凹面光栅同心

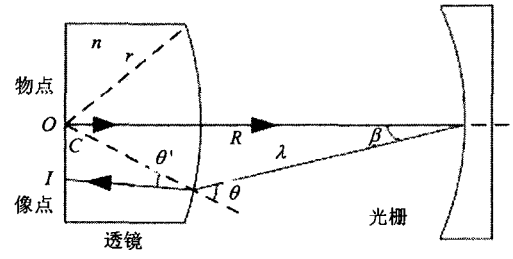


**图1　凹面光栅同心光谱仪结构图**

**Fig. 1　Schematic of concave grating concentric spectrometer**

**收稿日期**：2015-05-06，**修订日期**：2015-09-28
**基金项目**：国家自然科学基金项目(41504135)资助
**作者简介**：刘玉娟，女，1984年生，吉林大学仪器科学与电气工程学院讲师　　e-mail：xuliuyujuan@163.com
* 通讯联系人　　e-mail：lin_jun@jlu.edu.cn；zty@jlu.edu.cn；zhongzc@jlu.edu.cn

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

光谱仪光学系统由一个平凸透镜和一个凹面光栅组成，该系统仅有三个光学平面：平凸透镜的平面、平凸透镜的凸球面、凹面光栅的凹球面。除了平凸透镜的平面外所有球面的球心重合为一点C。

根据几何光学成像理论，凹面光栅同心光谱仪的物点O位于公共球心C点时，该同心光学系统具有无初级像差、高数值孔径(>0.6)、平像场、易于小型化等优点，但此时与物点O共轭的子午像点I也位于平凸透镜的平面上。设平凸透镜的折射率为$n$，平凸透镜的凸球面半径为$r$，凹面反射光栅的凹球面半径为$R$，光栅刻线密度为$N$。物点O发出的入射光线沿着光轴到达凹面光栅的入射角为零，设$\beta$为入射光$\lambda$经衍射后的衍射角，$\theta$为衍射光线到达平凸透镜的入射角，其折射角为$\theta'$，像点I到物点O的距离为$l$。此时由于光栅入射角为零，光栅方程[18]为

$$\sin\beta = m\lambda N \tag{1}$$

由Snell定律得

$$n\sin\theta' = \sin\theta \tag{2}$$

根据正弦定理，得

$$\frac{R}{\sin\theta} = \frac{r}{\sin\beta} \tag{3}$$

$$l = \frac{\sin\theta'}{\cos(\theta-\theta'-\beta)}r \tag{4}$$

令$\omega=\theta-\theta'-\beta$，则

$$l = \frac{1}{\cos\omega}r\sin\theta' \tag{5}$$

由式(5)可知，物像点之间的垂轴距离$l$较小。根据Hamilton波像差理论，当物点、像点的位置偏移会破坏系统的对称性，系统的像差会显著增加[19]，这大大提高了物面、像面的机械结构架设计及装调难度。

## 2 光线折叠式同心光栅光谱仪的设计

### 2.1 光谱仪原理

平面反射镜在改变光路方向的同时不会引入额外的像差，是能成完善像的最简单的光学元件。如图2所示，将平面反射镜引入同心光栅光谱仪光路，通过将成像光线偏折可实现物像面的分离。若平面反射镜与光轴的夹角为$\alpha$，与物面的轴向距离为$d$，像点I经平面镜反射后其像点分别为I′，设像点I′离中心C的距离为$l'$。

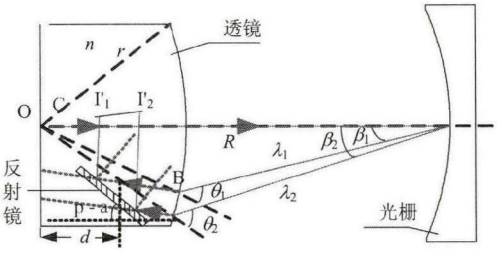


图2 光线折叠凹面光栅同心光谱仪结构图

Fig. 2 Schematic of concave grating concentric spectrometer with folding light

由如图2所示的三角关系得

$$|II'| = 2d\frac{\cos\alpha}{\cos\omega} \tag{6}$$

$$\angle 1 = \frac{\pi}{2} - (\alpha-\omega) \tag{7}$$

由余弦定理得

$$l'^2 = l^2 + |II'|^2 - 2l|II'|\cos\angle 1 \tag{8}$$

将式(5)—(7)代入式(8)得

$$l' = \frac{1}{\cos\omega}\sqrt{(r\sin\theta')^2 + (2d\cos\alpha)^2 - 4dr\sin\theta'\cos\alpha\sin(\alpha-\omega)} \tag{9}$$

对比式(5)与式(9)，可得，通过合理设计偏转反射镜的位置参数$d$和$\alpha$，不仅能实现物像面分离，而且能通过设计$d$，$\alpha$使$l'>l$，从而满足实际探测器的外形尺寸要求。

### 2.2 折叠式同心光栅光谱仪设计与优化结果

基于Dyson同心系统设计的凹面光栅同心光谱仪结构参数如表1所示。

表1 凹面光栅成像光谱仪参数表

Table 1 Parameters of concave grating imaging spectrometer

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 光谱范围/nm | 400～800 |
| 设计波长/nm | 600 |
| 凸球面曲率半径/mm | 46 |
| 凹球面曲率半径/mm | 132 |
| 平凸透镜光学玻璃 | K9 |
| 光栅刻线密度/(g·mm$^{-1}$) | 180 |

将表1参数代入式(1)—式(5)计算D光(589.29 nm)像面处像点位置可得，像点I到物点O的距离为9.24 mm，难以满足实际光电探测器的空间布置问题。为了解决此问题，采用与光轴的夹角为$\alpha$平面反射镜将像面折叠，结合实际选用的探测器尺寸在避免光线遮拦基础上可由式(6)—(9)计算平面镜倾角$\alpha$。如图3所示为利用仿真软件模拟像面转移光学系统的结构图，如图4所示为该系统的像差曲线，如图5所示为系统全视场点列图分布情况。

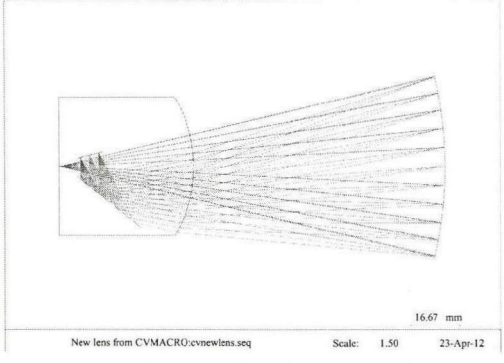


图3 凹面光栅同心光谱仪光学设计

Fig. 3 Optical design of concave grating concentric spectrometer

由图3—图5可知：折叠光线后系统的各个像差均控制较好，通过微调平面镜的倾角$\alpha$同时能对系统全波段像差进

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

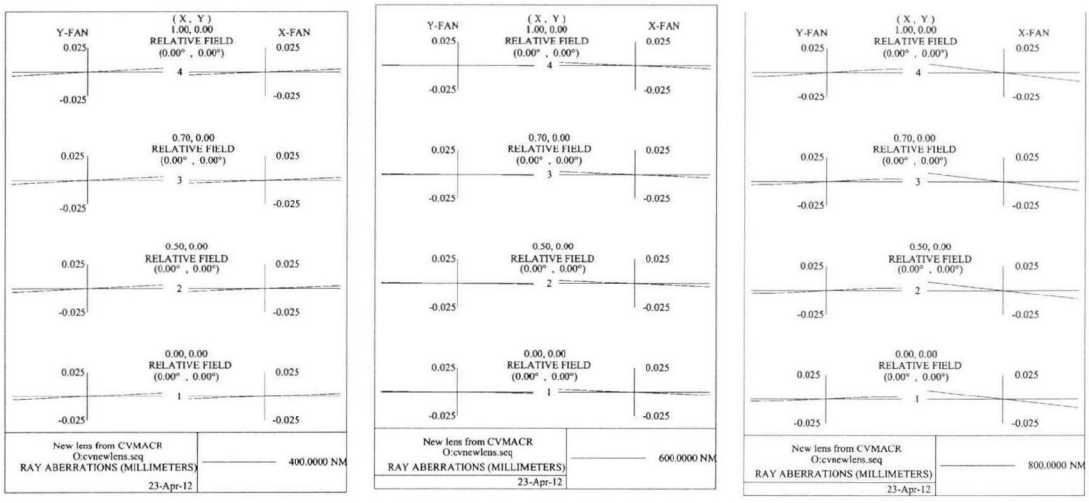


图 4　凹面光栅同心光谱仪像差曲线(全视场)

Fig. 4　Aberration curves of concave grating concentric spectrometer(all field)

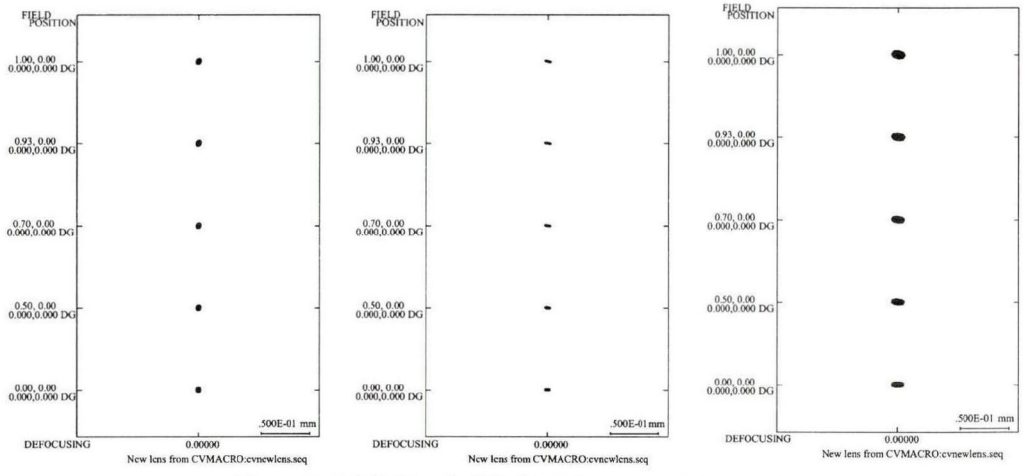


图 5　凹面光栅同心光谱仪点列图(40，600 和 800 nm)

Fig. 5　Spot diagrams of concave grating concentric spectrometer (400，600 and 800 nm)

行合理分配；全视场点列斑分布大小均匀，边界清晰，完全满足设计系统设计要求。

## 3　结　论

凹面光栅同心光谱仪由于采用同心光学结构，成像质量好、相对孔径可高达 0.6，这是传统光栅光谱仪难以达到的，但是存在物像面之间距离小限制器件的摆放的限制。采用光束偏折的方式在不引入额外的像差前提下将物面、像面分离是解决凹面光栅同心光谱仪物面与像面探测器的摆放问题有效途径，同时还可以通过调整偏折镜的角度实现成像点列斑及像差的全视场均衡分配。该研究对推进凹面光栅同心光谱仪的开发进程具有重要意义。

## References

[1] Goetz F H, Vane G, Solomon J E. Science, 1985, 228: 1147.
[2] Rockey D E. Soc. Photo Opt. Instrum. Eng., 1990, 29: 93.
[3] Thompson L L. Soc. Photo Opt. Instrum. Eng., 1990, 29: 105.
[4] Rast M, Bezy J L. Soc. Photo Opt. Instrum. Eng., 1990, 29: 114.
[5] Green R O. Appl. Opt., 1998, 37: 683.
[6] Mouroulis P. Proc. SPIE. 1998, 3842: 594.
[7] Mouroulis P, Thomads D A. Proc. SPIE, 1998, 3438: 31.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[8] Mouroulis P. Proc. SPIE, 1999, 3753: 133.
[9] Mouroulis P, Green R O. Appl. Opt., 2000, 39: 2210.
[10] Dyson J J. Opt. Soc. Am., 1959, 49: 713.
[11] Mertz L. Appl. Opt., 1977, 16: 3122.
[12] Lobb D R. Appl. Opt., 1994, 33: 2648.
[13] Lobb D R. Proc. SPIE, 1997, 3118: 339.
[14] Fisher J, Antoniades J, Rollins C. Proc. SPIE, 1998, 3842: 179.
[15] Mouroulis P, Green R O. SPIE, 2003, 5173: 18.
[16] Mouroulis P, Green R O, Wilson D W. Opt. Express, 2008, 16: 9087.
[17] WU Guo-an(吴国安). Design of Spectrometer(光谱仪器设计). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 1978.
[18] Namioka T. J. Opt. Soc. Am., 1959, 49(5): 446.
[19] Welford W T. Aberrations of Symmetrical Optical System(对称光学系统的像差). Translated by CHEN Huang-ming(陈晃明, 译). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 1982.

# Optimal Design of Light Folding Imaging Spectrometer Based on Dyson Concentric System

LIU Yu-juan[1], WANG Cheng-ming[1], LIN Jun[1*], CUI Ji-cheng[2], ZHANG Tian-yu[1*], ZHONG Zhi-cheng[1*]
1. College of Instrument Science & Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China
2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

**Abstract** Concave grating spectrometer based on Dyson concentric optical system has advantages of low aberration, large aperture and compact structure. The object plane and image plane of concentric spectrometer subsystem must be reunited into one plane while the distance between the object point and image point is relatively small. Thus it is difficult to satisfy this requirement for the existing focal plane of detection technology and assembly technology. In order to solve the assembly problem of the object and detector, the traditional Dyson concentric spectrometer was improved by introducing the off-axis mirror to shift the image light beam. The results show that the object plane and image plane of the improved system are separated successfully by the beam folding, and the aberration at all wavelengths is more rational distribution.

**Keywords** Imaging spectrum; Concentric; Dyson; Optical design

(Received May 6, 2015; accepted Sep. 28, 2015)

* Corresponding authors

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net