

文章编号 1004-924X(2013)10-2535-08

大相对孔径宽波段 Dyson 光谱成像系统

薛庆生*, 王淑荣, 于向阳

(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:提出了一种改进型 Dyson 光谱成像系统,以克服传统 Dyson 光谱成像系统焦平面探测器安置困难的缺点。首先,基于折射球面罗兰圆理论,提出了这种改进型 Dyson 光谱成像系统的光学设计方法。然后,利用 MATLAB 软件编制了初始结构参数快速计算程序。作为实例,设计了一个相对孔径为 $1/2$,波段为 $200\sim 1\ 000\text{ nm}$ 的 Dyson 光谱成像系统。利用自己编制的 MATLAB 程序计算了初始结构参数,利用光学设计软件 ZEMAX-EE 对该光谱成像系统进行了光线追迹和优化设计,并对设计结果进行分析。分析结果表明,在整个工作波段($200\sim 1\ 000\text{ nm}$)内,点列图半径均方根值小于 $4.2\ \mu\text{m}$,实现了大相对孔径宽波段像散同时校正,在宽波段内同时获得了良好的成像质量,满足设计指标要求。得到的结果验证了所提出的光学设计方法是可行的。

关键词:光学设计;Dyson 光谱成像系统;成像光谱仪;凹面光栅;罗兰圆

中图分类号:O433.1; TH744.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132110.2535

Dyson spectral imaging system with large relative aperture and wide spectral region

XUE Qing-sheng*, WANG Shu-rong, YU Xiang-yang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: xueqs_ciom@163.com

Abstract: A modified Dyson spectral imaging system was proposed to overcome the problems that the focal plane detector is hard to be arranged in a classical Dyson spectral imaging system. Firstly, the optical design method of the modified Dyson spectral imaging system was developed based on the Rowland circle theory of refractive spherical surface. Then, the initial parameter computing program was programmed using MATLAB software. As an example, a Dyson spectral imaging system operating in $200\sim 1\ 000\text{ nm}$ with a relative aperture $1/2$ was designed. The initial parameters were computed using proposed MATLAB program, and the ray tracing and optimization for the spectral imaging system were performed with ZEMAX-EE software. The analyzed results demonstrate that the Root Mean square(RMS) of a spot radius is less than $4.2\ \mu\text{m}$ in the whole working waveband (from 200 nm to $1\ 000\text{ nm}$), which implements astigmatism correction and obtains a good imaging quality in a wide spectral region and a large relative aperture. These results prove the feasibility of the optical design

收稿日期:2013-04-23;修订日期:2013-06-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41105014)

method proposed.

Key words: optical design; Dyson spectral imaging system; imaging spectrometer; concave grating; Rowland circle

1 引言

高空间分辨率和高光谱分辨率成像光谱仪(以下简称高分辨率成像光谱仪)是在多光谱遥感技术基础上发展起来的新一代航天和航空光学遥感仪器,能以高分辨率同时获取目标的空间和光谱信息,在航天和航空光学遥感中具有独特优势^[1-3]。高分辨率成像光谱仪普遍采用推扫的工作方式,一次获得目标一个条带(穿轨方向)的空间和光谱信息,随着沿飞行器运动方向的推扫,获取沿轨方向目标的空间和光谱信息。高分辨率成像光谱仪光学系统由望远系统和光谱成像系统两部分组成,望远系统的作用是把目标一个条带成像在光谱成像系统的入射狭缝上,光谱成像系统把入射狭缝进行色散并分波长成像在面阵探测器上^[4-5]。海洋水色遥感和大气遥感等遥感领域迫切需要高分辨率大相对孔径宽波段的成像光谱仪,因为相对孔径越大,仪器的集光能力越强,信噪比也就越高;仪器的波段越宽,获取的光谱信息越多,可探测的物质的种类就越多。

高分辨率成像光谱仪的光谱分辨率完全由光谱成像系统决定,空间分辨率也与光谱成像系统密切相关,因此,光谱成像系统是成像光谱仪的核心,它采用的光学结构直接影响整个成像光谱仪的性能、体积和重量等^[6]。Dyson 光谱成像系统^[7-8]由 Dyson 透镜和凹面光栅组成,Dyson 透镜的球面与凹面光栅同心,体积小,重量轻。与采用平面光栅的 Czerny-Turner 光谱成像系统^[9-10]和采用凸面光栅的 Offner 光谱成像系统^[11]相比,Dyson 光谱成像系统可获得更大的相对孔径,并且谱线弯曲(Smile)和谱带弯曲(Keystone)都很小^[12],光谱和辐射定标容易,因而受到极大关注。传统的 Dyson 光谱成像系统的像面位于 Dyson 透镜的平面上,焦平面探测器的放置非常困难,严重限制了传统 Dyson 光谱成像系统的实际应用。

本文为满足大相对孔径宽波段成像光谱仪

的要求,克服传统 Dyson 光谱成像系统焦平面探测器安置困难的缺点,提出了一种改进型 Dyson 光谱成像系统,与传统的 Dyson 光谱成像系统相比,探测器像面与 Dyson 透镜的平面之间离开了一定的距离,便于焦面焦平面探测器的放置。基于折射球面罗兰圆理论,提出了这种改进型 Dyson 光谱成像系统的光学设计方法,与传统的基于几何像差理论的方法相比,更容易获得像差校正条件与系统结构参数之间关系的解析表达式。编制了初始结构快速计算程序。利用 MATLAB 和 ZEMAX-EE 光学设计软件,设计了一个大相对孔径宽波段 Dyson 光谱成像系统实例,并对设计结果进行了分析与评价。

2 折射球面罗兰圆理论

凹面光栅的罗兰圆的概念是由 H. Beutler^[13]提出的,即入射狭缝中心、凹面光栅顶点和出射狭缝中心(像面中心)都位于以凹面光栅的曲率半径为直径的圆上,这个圆称之为罗兰圆。凹面光栅法线与罗兰圆的直径重合,光栅面在顶点处与罗兰圆相切。罗兰圆有两个特性:(1)罗兰圆上的一个物点,其子午像点也在罗兰圆上;(2)该罗兰圆上的像点无彗差。下面基于费马原理证明折射球面具有罗兰圆特性。如图 1 所示, $B_o(y_o, z_o)$ 为物面上的一点, D 为折射球面的顶点, R 为折射球面

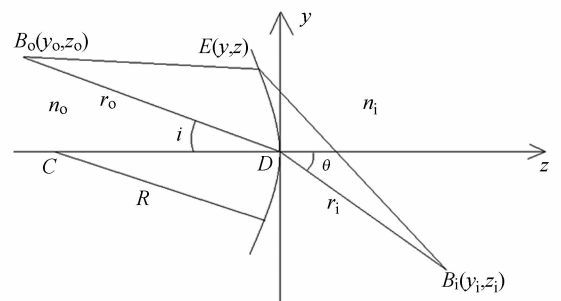


图 1 主光线和任意子午光线在球面上折射示意图
Fig. 1 Chief and arbitrary meridional rays refracted on a spherical surface

的半径, C 为折射球面的曲率中心, $E(y, z)$ 为折射球面上的任意点. n_o 和 n_i 分别为物空间和像空间的折射率, $B_i(y_i, z_i)$ 为 $B_o(y_o, z_o)$ 经球面折射所成的像点, r_o 和 r_i 分别为 $B_o(y_o, z_o)$ 和 $B_i(y_i, z_i)$ 与 D 点之间的距离, i 和 θ 分别为入射角衍射角.

光路 B_o-E-B_i 的光程函数为:

$$F = -n_o \overline{B_o E} + n_i \overline{E B_i} = -n_o \sqrt{(y-y_o)^2 + (z-z_o)^2} + n_i \sqrt{(y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}. \quad (1)$$

$E(y, z)$ 点坐标满足球面方程:

$$y^2 + (y-R)^2 + R^2. \quad (2)$$

光程函数 F 在 D 点附近进行泰勒展开, 令一阶微分 $dF/dy=0$ 得:

$$-n_o \frac{y_o}{r_o} + n_i \frac{y_i}{r_i} = 0. \quad (3)$$

令二阶微分 $d^2 F/dy^2=0$ 得:

$$-\frac{n_o}{r_o} \left[1 - \frac{z_o}{R} - \left(\frac{y_o}{r_o} \right)^2 \right] + \frac{n_o}{r_i} \left[1 - \frac{z_i}{R} - \left(\frac{y_i}{r_i} \right)^2 \right] = 0. \quad (4)$$

根据几何关系, $y_o = r_o \sin i, y_i = r_i \sin \theta, z_o = r_o \cos i, z_i = r_i \cos \theta$, 故式(4)可变形为:

$$n_o \left[\frac{\cos^2 i}{r_o} - \frac{\cos i}{R} \right] = n_i \left[\frac{\cos^2 \theta}{r_i} - \frac{\cos \theta}{R} \right]. \quad (5)$$

从式(5)可以看出, 若物点 B_o 在罗兰圆上, 即 $r_o = R \cos i, r_i = R \cos \theta$, 则像点 B_i 也位于罗兰圆上. 根据波像差理论^[13], 罗兰圆上像点的彗差由光程函数 F 的三阶微分 $d^3 F/dy^3$ 决定, $d^3 F/dy^3$ 可表示为:

$$\left. \frac{d^3 F}{dy^3} \right|_{y=0} = -n_o \frac{3y_o}{r_o^2} \left(\frac{\cos^2 i}{r_o} - \frac{\cos i}{R} \right) + n_i \frac{3y_i}{r_i^2} \left(\frac{\cos^2 \theta}{r_i} - \frac{\cos \theta}{R} \right). \quad (6)$$

若物点 B_o 在罗兰圆上, 则罗兰圆上的像点无彗差. 综合可以看出, 折射球面的罗兰圆具有与凹面光栅罗兰圆相同的特性.

3 宽波段像散校正理论

如图 2 所示, O 点为凹面光栅罗兰圆上的一点, 入射狭缝长度方向垂直于 yz 平面, O 点为入射狭缝的中心, O 点发出的主光线垂直入射到凹面光栅的顶点 O' 上, 某一波长为 λ 的衍射光线与

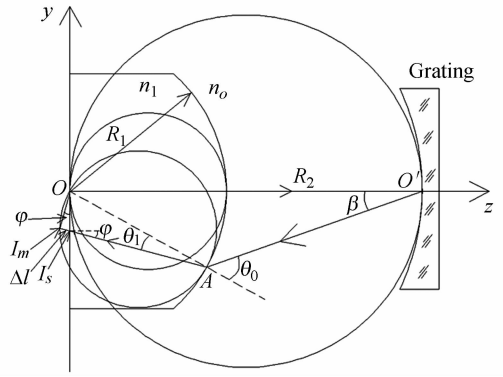


图 2 Dyson 光谱成像系统中的主光线光路

Fig. 2 Optical path of chief ray in Dyson spectral imaging system

Dyson 透镜球面的交点为 A 点, 根据上节所述的折射球面的罗兰圆理论, 子午像点为 Dyson 透镜球面罗兰圆上的 I_m 点, 弧矢像点为 Dyson 透镜平面上的 I_s 点. 子午像点与弧矢像点的距离差为像散, 可以表示为:

$$\Delta l = |AI_m| - |AI_s| = R_1 \sin \theta_1 \tan \varphi, \quad (7)$$

式中: R_1 为 Dyson 透镜球面罗兰圆直径, θ_1 为光线在 Dyson 透镜球面上的折射角, φ 为光线在 Dyson 透镜平面上的折射角. 由于弧矢像点位于 Dyson 透镜平面上, 所以在此平面上的折射只改变子午像点的位置, 对此折射平面应用式(5)得:

$$n_1 \frac{\cos^2 \varphi}{\Delta l} = \frac{\cos^2 \varphi'}{\Delta l'}, \quad (8)$$

式中: φ 为入射角, φ' 为折射角, $\Delta l'$ 为考虑平面折射后的像散, 再根据折射定律可得:

$$n_1 \sin \varphi = \sin \varphi'. \quad (9)$$

将式(7)和式(9)代入式(8)并整理得:

$$\Delta l' = R_1 \sin \theta_1 \tan \varphi \frac{1 - n_1^2 \sin^2 \varphi}{n_1 \cos^2 \varphi}. \quad (10)$$

由于 $\theta_1 \neq 0$, 若 $1 - n_1^2 \sin^2 \varphi = 0$, 则 $\varphi = \pm \arcsin(1/n_1)$, 一般玻璃的折射率为 1.5 左右, 则 $\varphi = \pm 41.8^\circ$, 如此大的角度显然是不合理的. 因此, 从式(10)可以看出, 像散校正条件是 $\varphi = 0$, 即:

$$\varphi = \theta_0 - \beta - \theta_1 = 0. \quad (11)$$

在三角形 $OO'A$ 中运用正弦定理得:

$$\frac{R_2}{\sin \theta_0} = \frac{R_1}{\sin \beta}. \quad (12)$$

根据光栅方程:

$$\sin \alpha + \sin \beta = m \lambda, \quad (13)$$

式中: $\alpha = 0$ 为凹面光栅入射角, β 为凹面光栅的衍

射角, m 为光栅衍射级次, g 为光栅刻线密度。把式(13)代入(12),并考虑到折射定律可得:

$$m\lambda g R_2 = R_2 \sin \beta = R_1 \sin \theta_0 = n_1 R_1 \sin \theta_1. \quad (14)$$

根据式(11)和(14),凹面光栅和 Dyson 透镜球面的半径比 σ 可表示为:

$$\sigma = \frac{R_2}{R_1} = \frac{\sin \theta_0}{\sin \beta} = \frac{\sin(\beta + \theta_1)}{\sin \beta} = \cos \theta_1 + \frac{\sin \theta_1}{\tan \beta} = \sqrt{1 - \sigma^2} \frac{\sin^2 \beta}{n_1^2} + \frac{\sigma \cos \beta}{n_1}. \quad (15)$$

求解方程(15)得:

$$\sigma = \frac{n_1}{\sqrt{1 - 2n_1 \cos \beta + n_1^2}}. \quad (16)$$

由式(14)可知,对于某一给定波长,衍射角 β 由光栅刻线密度 g 决定。要实现宽波段校正像散,需要选择 λ_a 和 λ_b 两个波长同时满足式(16),即:

$$\frac{n_1(\lambda_a)}{\sqrt{(1 - 2n_1(\lambda_a) \cos \beta(\lambda_a) + n_1^2(\lambda_a))}} = \frac{n_1(\lambda_b)}{\sqrt{(1 - 2n_1(\lambda_b) \cos \beta(\lambda_b) + n_1^2(\lambda_b))}}, \quad (17)$$

两边平方并整理得:

$$\frac{1}{n_1^2(\lambda_a)} - \frac{2 \cos \beta(\lambda_a)}{n_1(\lambda_a)} = \frac{1}{n_1^2(\lambda_b)} - \frac{2 \cos \beta(\lambda_b)}{n_1(\lambda_b)}. \quad (18)$$

根据式(13),衍射角的余弦可以用光栅密度 g 和波长 λ 表示:

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \sin^2 \beta} = \sqrt{1 - (mg\lambda)^{1/2}} \approx 1 - (mg\lambda)^2/2 - (mg\lambda)^4/8. \quad (19)$$

取衍射级次 $m=1$,并把式(19)代入(18)得:

$$\frac{1}{4} \left[\frac{\lambda_a^4}{n_1(\lambda_a)} - \frac{\lambda_b^4}{n_1(\lambda_b)} \right] g^4 + \left[\frac{\lambda_a^2}{n_1(\lambda_a)} - \frac{\lambda_b^2}{n_1(\lambda_b)} \right] + \frac{1}{n_1^2(\lambda_a)} - \frac{1}{n_1^2(\lambda_b)} - 2 \left[\frac{1}{n_1(\lambda_a)} - \frac{1}{n_1(\lambda_b)} \right] = 0. \quad (20)$$

式(20)有 2 个根,取正根。从式(20)求解出光栅刻线密度 g 后,再根据式(16)可求出半径比 σ 。

对于一个具体的设计,首先要根据仪器的色散要求和尺寸要求确定半径 R_1 或 R_2 ,然后再根据半径比 σ 确定另一半径。定义 λ_1 和 λ_2 分别为工作波段的最小波长和最大波长,工作波段 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$,中心波长 $\lambda_c = (\lambda_2 + \lambda_1)/2$ 。在整个工作波段内实现像散校正,即入射角 $\varphi \approx 0$,则整个工作波段在焦平面上的线色散宽度 Δp 可以表示为:

$$\Delta p \approx R_1 [\sin \theta_1(\lambda_2) - \sin \theta_1(\lambda_1)]. \quad (21)$$

取衍射级次 $m=1$,并把式(12)~(14)代入(21)得:

$$\Delta p \approx R_2 g \left[\frac{\lambda_2}{n_1(\lambda_2)} - \frac{\lambda_1}{n_1(\lambda_1)} \right] \approx \frac{R_2 g}{n_c} \left(\Delta\lambda + \lambda_c \frac{\Delta n}{n_c} \right), \quad (22)$$

其中:平均折射率 $n_c = [n_1(\lambda_2) + n_1(\lambda_1)]/2$,折射率差 $\Delta n = [n_1(\lambda_1) - n_1(\lambda_2)]$ 。

像面在 Dyson 透镜平面上带来焦平面探测器难以安置的问题,需要在 Dyson 光谱成像系统实际应用中解决。第一种方法是把像面与 Dyson 透镜的平面之间离开一定的距离,第二种方法是缩短像空间中光线在 Dyson 透镜中的光程。第一方法,随着像面与 Dyson 透镜平面上最佳像面之间偏离量的增大,成像质量会迅速变差,需要在 Dyson 透镜与凹面光栅之间插入非球面校正透镜进行校正。由于在两种介质界面上的折射不改变设计波长的像散校正条件,第二种方法不会使成像质量迅速变差,但会引入球差和色差。在主光线正入射条件下,Dyson 透镜在像空间的缩短量为 t ,则由此引起的三级轴向球差 LSA 为:

$$LSA = \frac{t(n_1^2 - 1)}{8n_1^3(F/\#)^2}, \quad (23)$$

式中: $F/\#$ 为相对孔径的倒数,对应 $n_1 = 1.5$, $F/\# = 2$ 的光谱成像系统,由式(17)求得 $LSA = 0.011574t$,可以看出,Dyson 透镜在像空间的缩短量 t 为几个毫米时,球差在允许范围内。考虑到色差的影响,最小弥散焦点与 Dyson 透镜的距离为:

$$d = \frac{t}{n_1} \left[1 - \frac{3}{32} \frac{n_1^2 - 1}{n_1^2 (F/\#)^2} \right]. \quad (24)$$

为了减小色差的影响,须把像面倾斜一个角度 ζ , ζ 可表示为:

$$\zeta = \arctan \left[\frac{d(\lambda_1) - d(\lambda_2)}{\Delta p} \right]. \quad (25)$$

4 初始结构的确定

Dyson 光谱成像系统的基本参数是波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 、 $F/\#$ 、狭缝长度 $2h$ 和系统色散宽度 Δp 。首先根据波段和透射率要求选择 Dyson 透镜的材料,选择两个设计波长 λ_a 和 λ_b ,根据式(20)确定光栅刻线密度 g ,根据式(16)确定半径比 σ ;然后根据系统色散宽度 Δp 和式(22)确定凹面光栅半径 R_2 ,再根据已求出的半径比 σ 和凹面光栅半径

R_2 确定 Dyson 透镜球面半径 R_1 ;最后选择 Dyson 透镜在像空间的缩短量为 t ,根据式 (24) 和 (25),确定像面与 Dyson 透镜的距离 d 和像面的倾斜角度 ζ 。用 Matlab 编制了改进型 Dyson 光谱成像系统的初始结构参数快速计算程序,程序框图如图 3 所示。

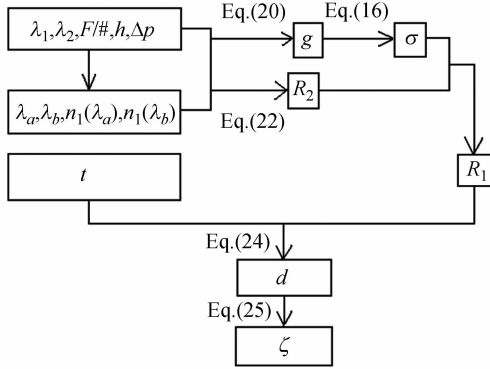


图 3 初始结构参数计算程序框图

Fig. 3 Program block diagram for computing initial structure parameters

表 1 改进型 Dysonr 光谱成像系统光学参数

Tab. 1 Optical parameters of modified Dyson spectral imaging system

Specifications	Initial parameter	optimized parameter
$g/(g \cdot \text{mm}^{-1})$	98.74	98.74
R_2/mm	235.71	242.17
σ	3.11	3.05
R_1/mm	75.79	79.35
t/mm	2	2
d/mm	1.32	1
$\zeta/(\text{^\circ})$	0.33	0.21

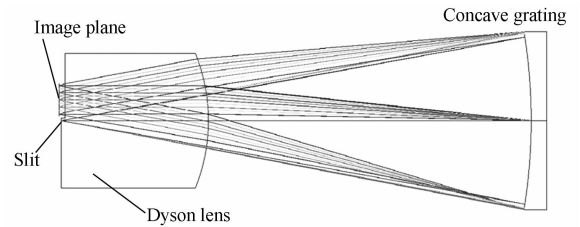


图 4 改进型 Dyson 光谱成像系统光路图

Fig. 4 Layout of modified Dyson spectral imaging system

5 设计实例及设计结果分析

5.1 设计实例

根据已论述的像差校正方法,设计了一个大相对孔径宽波段 Dyson 光谱成像系统,波段在 $200 \sim 1\,000\text{ nm}$,即 $\lambda_1 = 200\text{ nm}$, $\lambda_2 = 1\,000\text{ nm}$,中心波长 $\lambda_c = 600\text{ nm}$,入射狭缝尺寸为 $13\text{ mm} \times 26\text{ }\mu\text{m}$,即 $h = 6.5\text{ mm}$, $F/\# = 2$,采用 e2v 公司的面阵 CCD47-20 作为成像探测器,探测器的像尺寸为 $13.3\text{ mm} \times 13.3\text{ mm}$,像元数为 $1\,024 \times 1\,024$ 。焦面上色散宽度 $\Delta p = 13\text{ mm}$,对应光谱采样间隔为 0.8 nm ,光谱分辨率为 1.6 nm 。由于工作波段包含紫外波段,因此 Dyson 透镜选择物理和化学性能均良好的熔石英材料。设计波长选择 $\lambda_a = 400\text{ nm}$, $\lambda_b = 1\,000\text{ nm}$, $n_1(\lambda_a) = 1.469\,8$, $n_1(\lambda_b) = 1.450\,6$,利用 Matlab 程序计算的初始结构参数如表 1 所示,将初始结构参数导入光学设计软件 ZEMAX-EE 中进行光线追迹和优化设计,优化设计的光学结构参数如表 1 所示。图 4 为改进型 Dyson 光谱成像系统的光学结构图,从图 4 可以看出,Dyson 透镜在像空间缩短了一定的距离,方便了焦平面探测器的放置。

5.2 设计结果分析

图 5 为改进型 Dyson 光谱成像系统像面上的点列图,不同波长、不同视场的点列图弥散斑的几何直径均小于 $13.6\text{ }\mu\text{m}$,表明不同波长和不同视场的像差均得到了良好的校正。图 6 为不同视场点列图半径的 RMS 值随波长的变化曲线,从图 7 可以看出,边缘波长(200 nm 和 $1\,000\text{ nm}$)点列图半径的 RMS 值比中心波长的点列图半径的 RMS 大 $0.8\text{ }\mu\text{m}$,在整个工作波段内,点列图半径的 RMS 值均小于 $4.2\text{ }\mu\text{m}$,小于探测器像元尺寸的一半($6.5\text{ }\mu\text{m}$)。图 9 为不同波长的光学传递函数(MTF)曲线,由图 9 可知,不同波长的 MTF 在探测器的 Nyquist 频率 38.5 lp/mm 处均大于 0.72 ,满足 $\text{MTF} > 0.5$ 的设计指标要求。图 10 为不同波长的谱线弯曲,图 11 为不同视场的谱带弯曲。

从图 8 可以看出,谱线弯曲量与中心视场相关,随着波长的增大,谱线弯曲量也增大,但最大谱线弯曲量仅为 4.6% 个像元。从图 9 可以看出,随着视场的增大,谱带弯曲量也在增大,同一视场,边缘波长的谱带弯曲量大于中心波长的谱带弯曲量,最大谱带弯曲量小于 1% 像元,在光谱

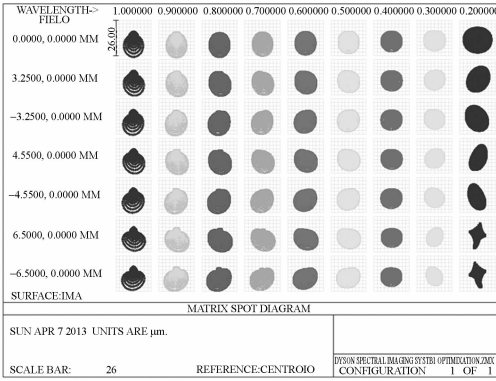


图 5 改进型 Dyson 光谱成像系统像面上的点列图
Fig. 5 Spot diagram of modified Dyson spectral imaging system

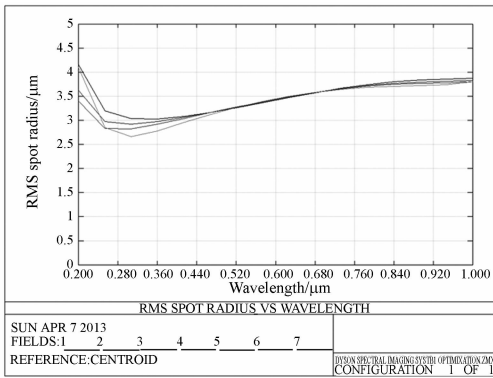
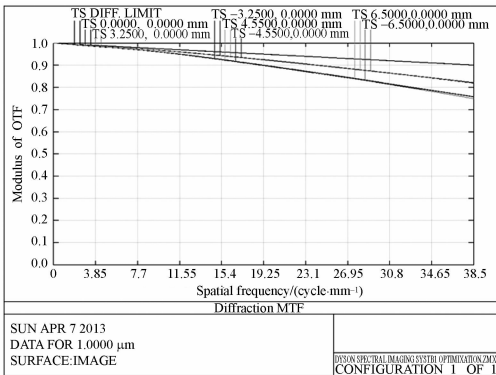
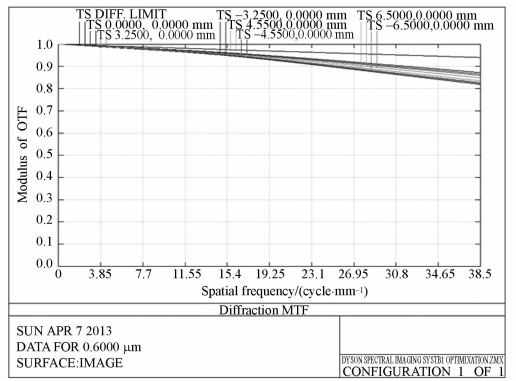


图 6 点列图半径的均方根值随波长的变化关系曲线
Fig. 6 RMS spot radius of versus wavelength

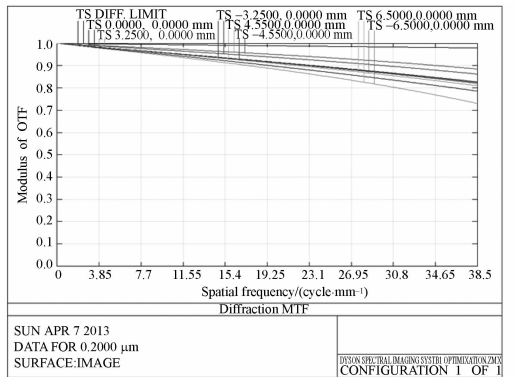
和辐射定标时可忽略。从分析结果可以看出, Dyson 光谱成像系统在整个工作波段内同时获得了良好的成像质量, 也证明了前文提出的设计方法是可行的。光学系统结构非常紧凑, 体积仅为 $243 \text{ mm} \times 84 \text{ mm} \times 84 \text{ mm}$ 。这种改进型 Dyson



(a)边缘波长 1 000 nm
(a) Marginal wavelength 1 000 nm



(b)中心波长 600 nm
(b)Central wavelength 600 nm



(c)边缘波长 200 nm
(c)Marginal wavelength 200 nm

图 7 不同波长的光学传递函数(MTF)曲线
Fig. 7 MTF of different wavelengths

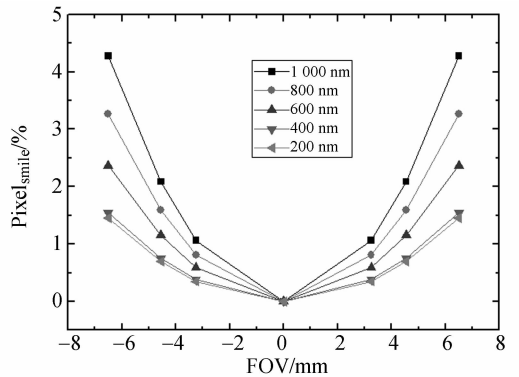


图 8 不同波长的谱线弯曲
Fig. 8 Total smiles for different wavelengths

光谱成像系统,探测器像面与 Dyson 透镜的平面离开一定的距离,方便了焦平面探测器的放置,满足高分辨率成像光谱仪的要求,并且体积小、质量轻,适合航空和航天遥感应应用。

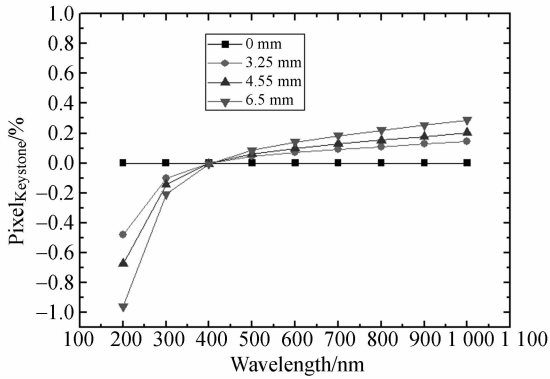


图 9 不同视场的谱带弯曲

Fig. 9 Keystone for different fields of view

6 结 论

为满足大相对孔径宽波段成像光谱仪的要

求,克服传统 Dyson 光谱成像系统焦平面探测器安置困难的缺点,基于球面折射面的罗兰圆理论,提出了一种改进型 Dyson 光谱成像系统光学设计方法,编制了初始结构参数快速计算程序。设计了一个 200~1 000 nm 的宽波段像差同时校正的 Dyson 光谱成系统实例,利用光学设计软件 ZEMAX-EE 对该光谱成像系统进行了光线追迹和优化设计,并对设计结果进行分析。分析结果表明,在整个工作波段(200~1 000 nm)内,全视场调制传递函数均达到 0.75 以上,实现了宽波段像差同时校正,在宽波段内同时获得了良好的成像质量,完全满足成像质量要求。结果也表明所提出的光学设计方法是可行的,为下一步在航空、航天高分辨率成像光谱仪中的应用奠定了技术基础。

参考文献:

- [1] 郑玉权,高志良. CO₂ 探测仪光学系统设计 [J]. 光学精密工程,2012,20(12):2645-2653.
ZHENG Y Q, GAO ZH L. Optical system design of CO₂ sounder [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2645-2653. (in Chinese)
- [2] 郑玉权. 温室气体遥感探测仪发展现状 [J]. 中国光学,2011,4(6):546-561.
ZHENG Y Q. Development status of remote sensing instruments for greenhouse gases [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(6): 546-561. (in Chinese)
- [3] 薛庆生. 星载宽波段远紫外高光谱成像仪光学系统设计 [J]. 光学学报,2013,33(3):0322001-1-0322001-7.
XUE Q SH. Optical system design of a spaceborne broadband far ultraviolet hyperspectral imager [J]. *Acta. Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0322001-1-7. (in Chinese)
- [4] 赵敏杰,司福祺,江宇,等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪的实验室定标[J]. 光学精密工程,2013,21(3):567-573.
ZHAO J M, SI F Q, JIANG Y, et al.. In-lab calibration of space-borne differential optical absorption spectrometer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3):567-573. (in Chinese)
- [5] 赵慧洁,程宣,张颖. 用于火星探测的声光可调谐滤波器成像光谱仪[J]. 光学精密工程,2012,20(9):1945-1952.
ZHAO H J, CHENG X, ZHANG Y. Design of acousto-optic imaging spectrometer for mars exploration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(9): 1945-1952. (in Chinese)
- [6] 郑玉权. 小型 Offner 光谱成像系统的设计[J]. 光学精密工程,2005,13(6):650-657.
ZHENG Y Q. Design of compact Offner spectral imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(6): 650-657. (in Chinese)
- [7] DYSON J. Unit magnification optical system without Seidel aberration [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1959, 49: 713-716
- [8] MOUROULIS P, GREEN R O, WILSON D W. Optical design of a coastal ocean imaging spectrometer [J]. *Opt. Express*, 2008, 35:9087-9096.
- [9] 薛庆生,陈伟. 改进的宽波段车尔尼-特纳光谱成像系统设计[J]. 光学精密工程,2012,20(2):233-240.
XUE Q S, CHEN W. Design of modified Czerny-Turner spectral imaging system with wide spectral region [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(2): 233-240. (in Chinese)
- [10] 薛庆生,林冠宇,陈伟. 用于大气临边探测的高光谱成像仪研制[J]. 仪器仪表学报,2012,33(5):1167-1173.

- XUE Q SH, LIN G Y, CHEN W. Development of hyperspectral imager for atmospheric limb sounding[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(5):1167-1173. (in Chinese)
- [11] 齐向东, 赧芃芃, 潘明忠, 等. 凸面光栅成像光谱仪的光谱定标[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12): 2870-2876.
- QIANG X D, HAN P P, PAN M ZH, *et al.*. Spectral calibration of imaging spectrometer with convex grating[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12):2870-2876. (in Chinese)
- [12] PANTAZIS M. Spectral and spatial uniformity in pushbroom imaging spectrometers [J]. *SPIE*, 1999, 3753:311-350.
- [13] BEULTER H. The theory of concave grating [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1945, 35:311-350.
- [14] 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- ZH Y M. *Applied Optics* [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2008. (in Chinese)

作者简介:



薛庆生(1979—),男,山东梁山人,博士,副研究员,2010年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事光学系统设计、航空和航天遥感成像光谱技术及光谱辐射定标等方面的研究。E-mail: xueqs_ciomp@163.com



于向阳(1979—),男,河南许昌人,博士研究生,现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所助理研究员,主要研究方向为空间遥感仪器的设计与研究。E-mail: yu_ciomp@163.com



王淑荣(1961—),女,吉林长春人,硕士,研究员,博士生导师,主要从事光学检测、紫外辐射计量测试及空间紫外光谱遥感技术的研究。E-mail: srwang@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)