

## 基于光-热-结构模拟的罗兰圆型光谱仪热工况优化设计

鲁毅 任万杰 郭国建 由欣然 胡国星 吴立军 孙逊

### Optimization design of thermal condition of Rowland circle spectrometer based on optical, thermal and structural simulations

LU Yi, REN Wanjie, GUO Guojian, YOU Xinran, HU Guoxing, WU Lijun, SUN Xun

引用本文:

鲁毅,任万杰,郭国建,等. 基于光-热-结构模拟的罗兰圆型光谱仪热工况优化设计[J]. 应用光学, 2023, 44(1): 37-45. DOI: 10.5768/JAO202344.0101006

LU Yi, REN Wanjie, GUO Guojian, et al. Optimization design of thermal condition of Rowland circle spectrometer based on optical, thermal and structural simulations[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(1): 37-45. DOI: 10.5768/JAO202344.0101006

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0101006>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 空间外差拉曼光谱仪成像镜头光机热集成分析

Thermal/ structural/optical integrated analysis on spatial heterodyne Raman spectrometer imaging lens

应用光学. 2018, 39(3): 332-338 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0301006>

#### 星载激光雷达滤波器组件热分析及参数优化

Thermal analysis and parameter optimization of spaceborne lidar filter

应用光学. 2017, 38(4): 660-664 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0407001>

#### 某光电吊舱内方位电机组件低温摩擦特性分析研究

Analysis of friction characteristics at low temperature of interior orientation motor assembly in an electro-optical pod

应用光学. 2017, 38(5): 700-705 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0501004>

#### 表面贴装封装发光二极管的结构设计

Structure design of LED in surface mount package

应用光学. 2018, 39(4): 556-562 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0405001>

#### 机载相机非球面光学系统热光学特性分析

Analysis of thermal optical properties of airborne camera aspheric optical system

应用光学. 2020, 41(2): 270-275 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0201006>

#### 水下航行器热尾流目标海面探测红外成像仿真

Infrared imaging simulation of sea surface detection of underwater vehicle thermal wake target

应用光学. 2019, 40(4): 525-534 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0401001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 01-0037-09

# 基于光-热-结构模拟的罗兰圆型 光谱仪热工况优化设计

鲁毅<sup>1</sup>, 任万杰<sup>1</sup>, 郭国建<sup>1</sup>, 由欣然<sup>1</sup>, 胡国星<sup>1</sup>, 吴立军<sup>1</sup>, 孙逊<sup>2</sup>

(1. 中国兵器工业集团 山东非金属材料研究所, 山东 济南 250001;

2. 山东大学 机械工程学院 高效洁净制造教育部重点实验室, 山东 济南 250061)

**摘要:** 针对目前紫外光谱仪热工况优化研究缺乏的问题, 该文设计出一款探测范围为 200 nm~450 nm、全波段分辨率不低于 0.2 nm 的罗兰圆光谱仪, 并耦合光、热、结构模拟对其光室热工况开展优化研究。热仿真结果表明: 在无加热、无入口风速下光谱仪底座温度、温差随时间不断增加, 难以达到热平衡; 优化光室入口风速, 发现当入口风速为 0.8 m/s 时, 整体温度降至 36.103 °C~39.859 °C; 基于光学器件间的热变形量的计算, 光学器件截距总热变形量为 0.203 mm; 优化加热方式, 发现顶层式加热方式最佳, 整体温度降至 34.241 °C~36.139 °C, 光学器件截距总热变形量降至 0.122 mm。对此进行光学仿真, 结果表明, 优化工况后的罗兰圆光谱仪工作热变形后可清晰分辨出两束波长相差 0.2 nm 的光束。

**关键词:** 罗兰圆型光谱仪; 热工况优化; 热分析; 光仿真

中图分类号: TN202; TH744.1

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0101006

## Optimization design of thermal condition of Rowland circle spectrometer based on optical, thermal and structural simulations

LU Yi<sup>1</sup>, REN Wanjie<sup>1</sup>, GUO Guojian<sup>1</sup>, YOU Xinran<sup>1</sup>, HU Guoxing<sup>1</sup>, WU Lijun<sup>1</sup>, SUN Xun<sup>2</sup>

(1. Shandong Institute of Nonmetallic Materials, China North Industries Group Corporation Limited, Jinan 250001, China; 2. Key Laboratory of High Efficiency and Clean Mechanical Manufacture (Ministry of Education), School of Mechanical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of lack of research on optimizing thermal condition of ultraviolet spectrometers, a Rowland circle spectrometer with a detection range of 200 nm~450 nm and a full-band resolution of no less than 0.2 nm was designed, and optimized the thermal conditions of its optical chamber by coupling optical, thermal and structural simulations. The thermal simulation results showed that the temperature and temperature difference of the spectrometer base was increased with time in the absence of heating and inlet wind speed, and it was difficult to achieve thermal balance. The inlet wind speed of optical chamber was optimized, and it was found that when that was 0.8 m/s, the overall temperature was dropped to 36.103 °C~39.859 °C. Based on the calculation of thermal deformation between optical devices, the intercept of total thermal deformation of several optical devices was 0.203 mm. After refining the heating method, the top-layer heating was found to be the best way, the overall temperature was dropped to 34.241 °C~36.139 °C, and the intercept of total thermal deformation was reduced to 0.122 mm. The optical simulation results show that the optimized Rowland circle spectrometer can still clearly distinguish the two beams with a wavelength difference of 0.2 nm after thermal deformation.

**Key words:** Rowland circle spectrometer; thermal condition optimization; thermal analysis; optical simulation

收稿日期: 2022-04-15; 修回日期: 2022-06-27

基金项目: 解放军装备发展部技术基础项目

作者简介: 鲁毅 (1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事油料发射光谱仪的研发与应用。E-mail: titi\_ly@sina.com

通信作者: 孙逊 (1989—), 男, 博士, 副研究员, 博士生导师, 主要从事光谱仪方面的研究。E-mail: xunsun@sdu.edu.cn

## 引言

光谱仪是将复杂成分的光分解成不同波长光谱线的科学仪器,可用于测量金属材料中所含元素的种类和含量,被广泛应用于生物、医疗、化工等领域<sup>[1-2]</sup>。国内外学者对光谱仪进行了大量的分析设计,如日本横滨研发了光谱测量范围为340 nm~750 nm,分辨率达14 nm的微型MEMS<sup>[3]</sup>;浙江大学夏果等人<sup>[4]</sup>研制了光谱测量范围为300 nm~800 nm,分辨率达0.4 nm的微型、宽波段、高分辨率C-T光谱仪。目前研究的光谱仪多数为了适用于高分辨率、体积小场合的C-T光路结构,但该类光谱仪由于光学器件数量多,不适用于检测反射率较低的紫外光区<sup>[5]</sup>。目前,紫外光谱仪典型代表<sup>[6-8]</sup>有美国海洋光学的Maya系列紫外光谱仪、日本HAMAMATSU公司TM系列光谱仪、上海复享公司的FX2000紫外光谱仪等。紫外光谱仪工作时,内部工作温度会使光学器件间距离、角度产生热变形,从而导致聚焦效果变差,影响光谱仪成像质量。因此,实际应用中一般通过系统内部加热使其工作温度维持稳定,从而实现较高的成像效果。目前对光谱仪进行热应变分析多集中在应用于外太空条件或者恶劣环境下的光谱仪<sup>[9-10]</sup>,而对紫外光谱仪热分析的文献较少。

本文利用光-热-结构模拟对多通道罗兰圆型光谱仪的热工况开展优化研究。根据设计需要,对光学参数进行选型,分析不同风速、不同加热方式对系统温度场、热变形与光路的影响规律,并基于Zemax光学设计软件对设计模型进行验证,使其在热工况下仍可满足设计要求。

## 1 光谱仪设计

本文设计的光谱仪指标为:探测范围为200 nm~450 nm,全波段分辨率不低于0.2 nm,整体光学结构尺寸小于400 mm×500 mm,其中200 nm~380 nm波段属于近紫外区,380 nm~450 nm波段属于可见光谱区。由于紫外光在普通镀膜光学器件上反射率低,因此选用罗兰圆光学结构。罗兰圆型光谱仪工作原理是,当缝光源与光栅放置在直径等于凹面光栅曲率半径的圆周上时,经光栅分光后光线的理想光谱接收谱面必定在罗兰圆周上<sup>[11]</sup>,罗兰圆型光谱仪以凹面光栅作为分光器件,凹面光栅在色散的同时聚焦谱线<sup>[12-13]</sup>,减少光学器件的使用概率,从而提高紫外光的反射率。

罗兰圆光学结构主要参数有:凹面光栅曲率半径 $R$ 、入射狭缝到衍射光栅距离 $f_1$ 、凹面光栅焦距 $f_2$ 、准直透镜焦距 $f$ 、光栅常数 $k$ 、光栅入射角 $\alpha$ 、衍射角 $\beta$ 和入射狭缝宽度 $d$ 。具体光学结构和参数如图1所示。

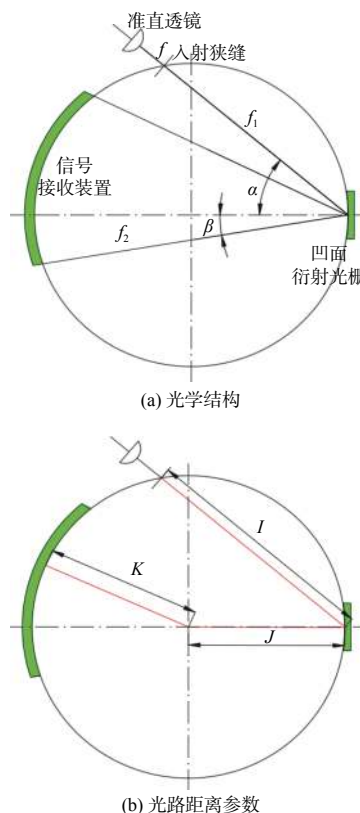


图1 罗兰圆光谱仪概念图

Fig. 1 Concept diagram of Rowland circle spectrometer

凹面衍射光栅是罗兰圆光学结构核心部件,直接影响整个仪器性能,因此必须对凹面衍射光栅进行选型。罗兰圆光学结构中凹面衍射光栅曲率半径与罗兰圆直径大小一致,根据设计的尺寸需要,选用曲率半径 $R=398.83$  mm的凹面衍射光栅,就可确定凹面光栅焦距 $f_2$ 。准直透镜影响罗兰圆光谱仪光谱响应范围,经分析可知氟化镁的透光范围为120 nm~7 000 nm,适合设计所需光谱响应范围,因此,选择THORLABS公司的LA6005氟化镁平凸透镜,曲率半径为37.8 mm,中心厚度为4.3 mm,边缘厚度为2.1 mm,后焦距为97.1 mm,外形为平凸镜。罗兰圆直径为398.83 mm,氟化镁平凸透镜后焦距为97.1 mm,所以设计的结构可满足整体尺寸要求。

凹面衍射光栅常用刻线密度有1 200线/mm、1 600线/mm、2 400线/mm等,光谱检测范围随刻

线密度增加而降低,但光谱分辨率随刻线密度增加而增加。本文设计要求探测范围为 200 nm~450 nm,全波段分辨率不低于 0.2 nm,分辨性能要求高于探测范围要求,因此初选刻线密度为 2400 线/mm,光栅常数  $k = 1/2400 \text{ mm} = 0.0004167 \text{ mm}$ 。在刻线密度确定情况下,其探测范围受光栅入射角  $\alpha$  控制,罗兰圆光学结构最佳入射角为  $15^\circ \sim 65^\circ$ ,初选入射角为  $40^\circ$ 。探测范围依据光栅色散方程确定,即:

$$m\lambda = k \times (\sin\alpha - \sin\beta) \quad (1)$$

式中:  $m$  为衍射级次,通常取  $m = 1$ ;  $\lambda$  为探测波长;  $k$  为光栅常数;  $\alpha$  为光栅入射角;  $\beta$  为衍射角。根据色散方程可知,当入射角  $\alpha$  为  $40^\circ$  时,衍射角  $\beta$  范围为  $9.37^\circ \sim -25.93^\circ$ 。因为  $|-25.93^\circ| < 40^\circ$ ,信号采集装置不会影响入射狭缝的安装,因此确定刻线密度为 2400 线/mm,入射角为  $40^\circ$ ,衍射角  $\beta$  为  $9.37^\circ \sim -25.93^\circ$ 。

入射狭缝影响光谱仪分辨率及光通量大小<sup>[14]</sup>。对 (1) 式两侧求波长  $\lambda$  的微分可得:

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{k \cos\beta} \quad (2)$$

设狭缝宽度为  $d$ ,狭缝像宽为  $d_1$ ,  $\sin\Delta\beta \approx \Delta\beta$ ,则狭缝像在像面上的分开角度为

$$\Delta\beta = \frac{d_1}{f_2} \quad (3)$$

式中  $f_2$  为凹面衍射光栅焦距。将 (2) 式代入 (3) 式,可得狭缝像两边缘相差的波长:

$$\Delta\lambda = k \frac{d_1}{f_2} \cos\beta \quad (4)$$

对狭缝像进行分析,发现狭缝宽度引起凹面光栅入射角的变化量为  $\Delta\alpha$ ,引起衍射角的变化量为  $\Delta\beta$ 。对 (1) 式进行微分可得:

$$k \times (\sin(\alpha + \Delta\alpha) - \sin(\beta + \Delta\beta)) = \lambda \quad (5)$$

将 (5) 式减去 (1) 式,化简可得:

$$\frac{\Delta\beta}{\Delta\alpha} = \frac{\cos\alpha}{\cos\beta} \quad (6)$$

由于狭缝宽为  $d = f_1 \Delta\alpha$ ,狭缝像高为  $d_1 = f_2 \Delta\beta$ ,其中  $f_1$  为子午面上入射狭缝到凹面衍射光栅的距离,则有:

$$\frac{d_1}{d} = \frac{f_2 \cos\alpha}{f_1 \cos\beta} \quad (7)$$

将 (7) 式代入 (4) 式可得狭缝像光谱带宽<sup>[15]</sup>为

$$\Delta\lambda = \frac{dk}{mf_1} \cos\alpha \quad (8)$$

本文设计要求全波段分辨率不低于 0.2 nm,故取  $\Delta\lambda = 0.2 \text{ nm}$ 。由于入射角  $\alpha$  为  $40^\circ$ ,根据几何关系计算可得  $f_1 = 305.52 \text{ mm}$ ,依据 (8) 式计算可得  $d = 112 \mu\text{m}$ 。对该光谱仪的几个常用特征谱线进行仿真分析,所选特征谱线为 253.65 nm、296.73 nm、313.5 nm、365.05 nm、404.57 nm 和 435.88 nm,仿真光路图如图 2(a) 所示。由图 2(a) 可知,常用特征谱线在所设计的罗兰圆光学结构上分光、聚焦效果良好。由于 (8) 式计算的是狭缝像两边缘之间的波长差,无法保证边缘波长刚好为该波长的中心位置,因此,为保证分辨率设计要求,初取狭缝宽度  $d$  为  $30 \mu\text{m}$ 、 $40 \mu\text{m}$  及  $50 \mu\text{m}$ ,选用光谱谱线 253.6 nm 及其相差 0.2 nm 波长的光进行光学仿真,仿真结果如图 2 所示。从图 2 可看出,狭缝宽度  $d = 40 \mu\text{m}$  时,在 253.6 nm 波长处分辨率达 0.2 nm。为保证全波段分辨率达 0.2 nm,选择狭缝宽度  $d = 30 \mu\text{m}$ ,对剩余常用特征光谱线进行点列图分析,具体分析结果如图 3 所示。仿真结果表明,本文设计的光学系统参数可满足探测范围为 200 nm~450 nm,全波段分辨率不低于 0.2 nm 的指标要求。罗兰圆光学结构总体光学参数指标如表 1 所示。

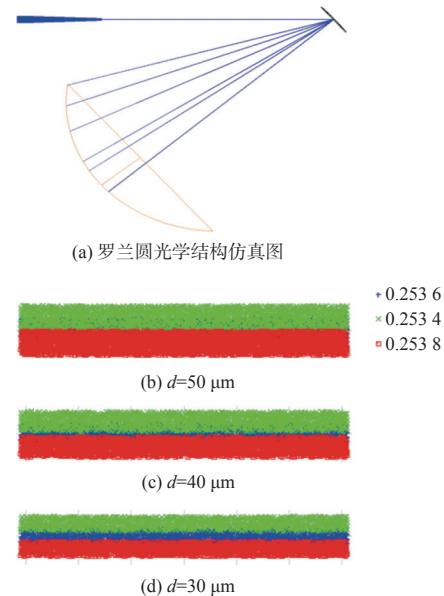


图2 测量范围为 200 nm~450 nm 的罗兰圆光学结构仿真图及不同狭缝宽度时 253.6 nm 波长点列图

Fig.2 Optical structure simulation diagram of Rowland circle with measuring range of 200 nm~450 nm and wavelength spot diagram of 253.6 nm at different slit widths



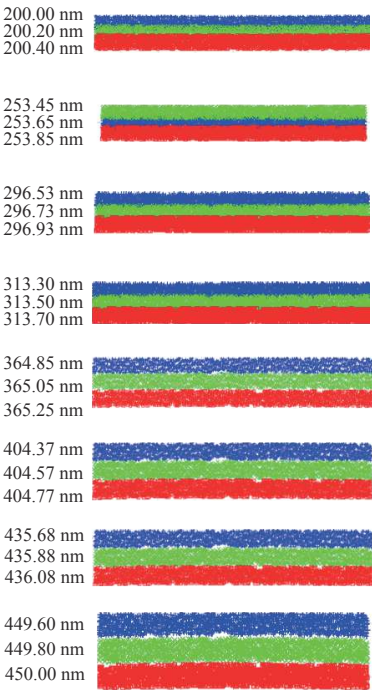


图 3 测量范围为 200 nm~450 nm 的罗兰圆光学结构光谱仪全波段特征谱线、边缘谱线的点列图

Fig. 3 Spot diagram of full-band feature lines and edge lines of Rowland circle spectrometer with measuring range of 200 nm~450 nm

表 1 罗兰圆光学结构总体光学参数指标

Table 1 Overall optical parameters of optical structure of Rowland circle

| 光学元件   | 光学参数                         | 数值         |
|--------|------------------------------|------------|
| 凹面衍射光栅 | 曲率半径 $R/\text{mm}$           | 398.83     |
|        | 光栅常数 $k/\text{mm}$           | 0.0004167  |
|        | 衍射角 $\beta/(\text{^\circ})$  | 9.37~25.93 |
| 入射狭缝   | 到衍射光栅距离 $f_1/\text{mm}$      | 305.52     |
|        | 狭缝宽度 $d/\mu\text{m}$         | 30         |
|        | 入射角 $\alpha/(\text{^\circ})$ | 40         |
| 准直透镜   | 焦距 $f/\text{mm}$             | 97.1       |

2 光谱仪概述及仿真分析

根据罗兰圆光谱仪总体光学参数进行建模,罗兰圆型光谱仪分为底座、入射狭缝、光栅以及信号采集装置 4 个部分。光谱仪主要热源来源于信号采集装置的电荷耦合元件 CCD (charge coupled device),其长期功耗为 4 W。CCD 在信号采集装置的安装位置如图 4 所示。其中信号采集装置 1 的 CCD 接受面与水平面垂直,信号采集装置 2 是通过反光镜将谱线折射到 CCD 接收面上,使 CCD 接

收面与水平面平行。该方案是考虑到罗兰圆结构光学理论谱线接收面为曲面,而信号采集装置所用的 CCD 为平面,所以需用多个 CCD 使其整体实际谱线接收面近似为曲面,在一定的底座安装空间安装最多的 CCD 以实现曲面的拟合。该光谱仪入射狭缝、光栅及其底座无热量释放,故建模时对人射狭缝、光栅及底座进行简化,忽略对分析结果影响较小的空洞和螺纹孔等部分。光谱仪光室为覆盖罗兰圆光谱仪整体的六面体结构,并设置有出入风口进行散热,具体固体域及流体域如图 5 所示。

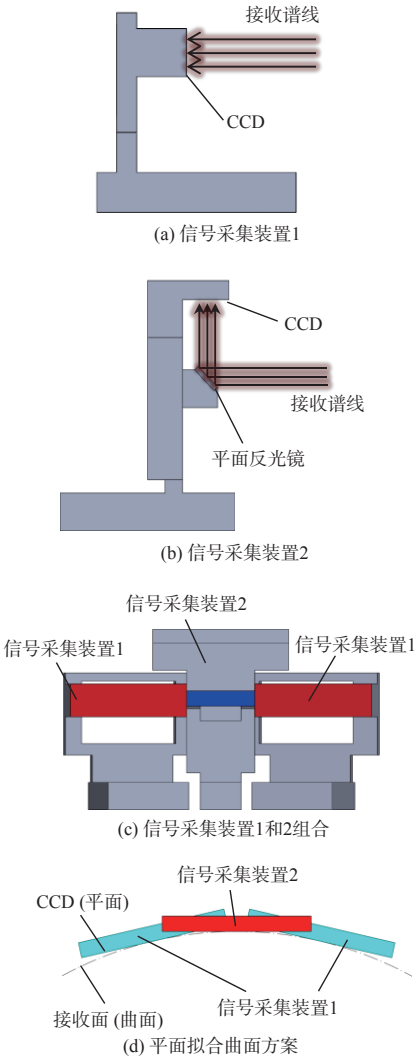


图 4 电荷耦合元件 CCD 安装位置图  
Fig. 4 Installation position diagram of CCD

为实现罗兰圆光谱仪热工况优化,本文对光谱仪在无加热、底层加热系统、四周环绕式加热系统及顶层式加热系统 4 种不同方式进行热仿真,探究不同加热系统对罗兰圆光谱仪所产生的影响。不

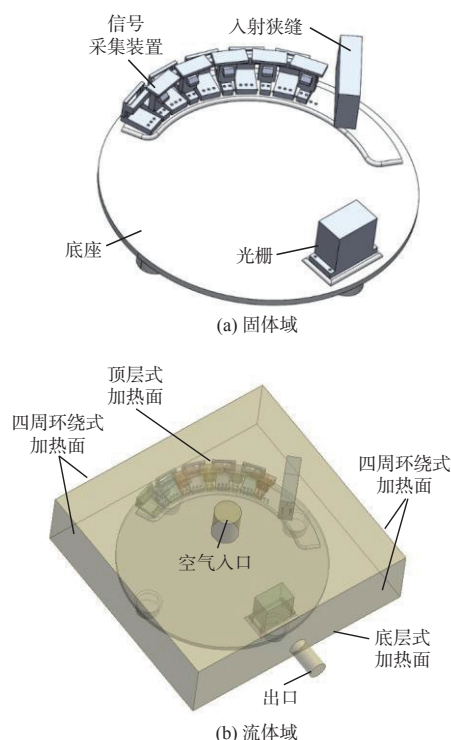


图5 罗兰圆光谱仪光室组件结构

Fig. 5 Structure diagram of optical chamber assembly of Rowland circle spectrometer

同加热系统加热面放置位置如图5(b)所示。由于电瓷加热片具有良好的热均匀性,升温快且发热量均匀<sup>[16]</sup>,因此该光谱仪加热系统工作热源选取电瓷加热器。本文对光室每个部位均采用四面体网格划分,以优化网格质量,并对罗兰圆底座网格进行细化,以精确反映底座温度变化。光谱仪光室流体域内为空气,其密度、比热容和导热率分别设为  $1.127 \text{ kg/m}^3$ 、 $1.005 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$  和  $0.271 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 。光谱仪各部分材料及热物性参数如表2所示。

表2 光谱仪各部分材料及热物性参数

Table 2 Materials and thermal properties of each part of spectrometer

| 部件名称  | 材料  | 密度 $\rho$<br>( $\text{kg/m}^3$ ) | 比热容 $c_p$<br>( $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$ ) | 导热率 $\lambda$<br>( $\text{W/m} \cdot \text{K}$ ) |
|-------|-----|----------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 入射狭缝  | 钢   | 7 800                            | 0.46                                           | 48.5                                             |
| 光栅    | 铝合金 | 2 770                            | 0.88                                           | 237                                              |
| 探测装置  | 铝合金 | 2 770                            | 0.88                                           | 237                                              |
| 罗兰圆底座 | 钢   | 7 800                            | 0.46                                           | 48.5                                             |

热量传递方式包括热传导、热对流和热辐射。光室中热辐射传热量较其他2个传热方式可忽略不计,因此,本文不考虑热辐射所产生的影响。光谱仪加热源为电瓷加热片,可维持为恒温

状态,其热边界条件如下所述。

在光谱仪光室电瓷加热片放置部位壁面给定热条件<sup>[17]</sup>为

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = q \quad (9)$$

在光谱仪与光室流体域给定对流换热条件为

$$k_x \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_y \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_z \frac{\partial T}{\partial z} n_z = h(T_0 - T_1) \quad (10)$$

式中:  $n_x$ 、 $n_y$ 、 $n_z$  为边界外法线的方向余弦;  $q$  为热流密度;  $h$  为对流换热系数;  $T_0$  为温度条件。采用有限元体积法将光谱仪整体系统空间域离散,构造泛函方程,得到稳态传热的有限元方程为

$$KT = P \quad (11)$$

式中:  $K$  为热传导矩阵;  $P$  为温度载荷矩阵。通过求解方程(11)可得温度场各个节点温度值,将节点温度值线性近似表示光室连续分布的温度场。

热载荷作用下光谱仪材料本身会产生热应变,同时由于光谱仪系统本身的固定约束会阻止此变形,产生热应力  $\sigma$ 。利用最小势能原理构造泛函函数:

$$\begin{aligned} KU &= P_1 \\ P_1 &= P_f + P_t + P_{e0} \\ P_{e0} &= \sum_{\Omega} \int B^T D \epsilon_0 d\Omega \end{aligned} \quad (12)$$

式中:  $K$  为刚度矩阵;  $U$  为位移矩阵;  $P_1$  为外载荷矩阵;  $P_f$ 、 $P_t$ 、 $P_{e0}$  分别为体积载荷、面积载荷以及温度载荷;  $B$  为应变矩阵;  $D$  表示温度矩阵;  $\epsilon_0$  为热应变。

热-结构耦合可分为直接耦合和间接耦合两种方式。直接耦合在计算时同时考虑温度与热变形,计算量大,但更贴近实际工况;间接耦合则是将温度分析结果作为边界条件施加至结构分析中,没有考虑热变形对温度场的影响,计算量较小。由于本文分析光谱仪需预热达到热平衡后开始工作,热平衡温度分析属于稳态热分析,直接耦合和间接耦合分析方式结果差别小,故采用计算量较少的间接耦合方式。

基于光谱仪热变形结果,对其进行光学仿真。光谱仪光路参数见图1所示。光由入射狭缝发出,经光栅分光 and 聚焦后,在信号采集装置上形成谱面,入射狭缝与光栅的距离  $f_1$ 、光栅与信号采集装置之间的距离  $f_2$  直接影响成像效果。因为信号采集装置位于罗兰圆周上,光栅与信号采集装置之间的距离可分成光栅到罗兰圆中心的距离以及罗兰圆中心到信号采集装置的距离两部分,见图1(b)

所示。将光学器件距离参数分成入射狭缝到凹面光栅的距离 $I$ 、凹面光栅到罗兰圆中心的距离 $J$ 、罗兰圆中心到信号采集部位的距离 $K$ 这3部分,其热变形量分别对应 $i$ 、 $j$ 、 $k$ ,将其影响引入光学仿真,计算热工况优化前后信号采集装置对成像效果的影响。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 入口风速选择

图6为无加热系统下光谱仪最高温度、最低温度随时间变化曲线图。光谱仪开始工作后,由于CCD发热且无散热系统,底座最高温度位于CCD所处位置,且其数值迅速升高;而远离CCD、靠近出风口处温度最低,温度增加速度缓慢,温差随时间不断增大。420 s后两者温度增加速度变化无明显变化,难以达到热平衡,因此需添加散热系统,促进热平衡,同时降低底座温度。

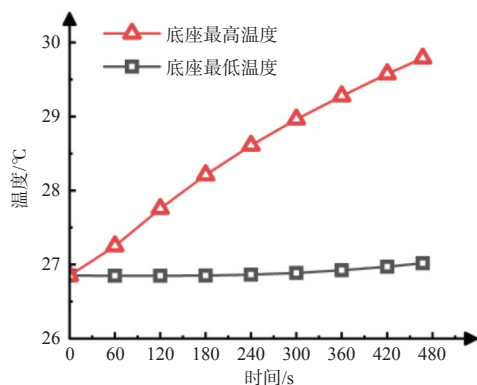
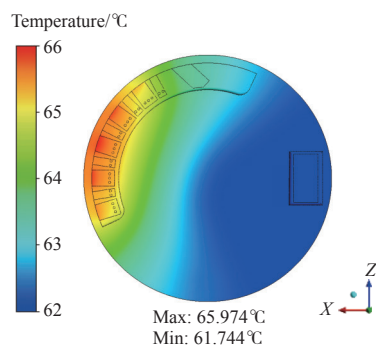


图6 无加热系统时底座最高温度、最低温度随时间的变化曲线

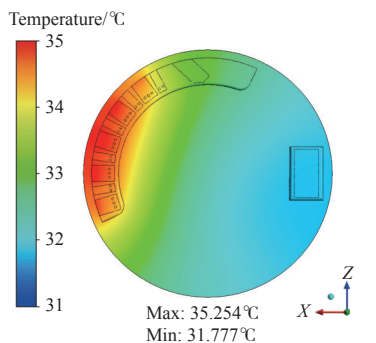
Fig. 6 Variation curves of maximum and minimum temperatures of base with time without heating system

降低底座温度,有助于光学、电子器件的正常运行,减轻底座形变。本文对无加热系统下不同入口风速对光谱仪光室底座温度的影响进行研究,光谱仪温度场分布如图7所示。由图7可知,不同风速工况下的温度场分布规律基本一致,底座温度分布呈现一定梯度,热源CCD所处部位温度最高,远离热源靠近出风口处底座温度最低。入口风速从0.2 m/s增加到1.5 m/s,底座平均温度迅速降低,最高温度及最低温度分别下降了30.72℃、29.967℃。该结果表明,空气与光谱仪间的对流换热起到很好的散热作用,空气将热源CCD热量带到四周,显著降低了底座的平均温度。由于风速

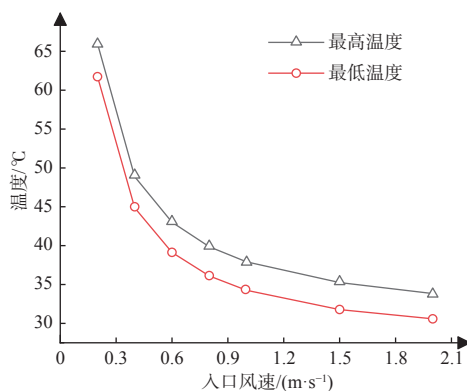
过低将导致底座热变形过大,光学器件无法正常工作;而风速过高会导致内部振动,从而影响器件性能,需综合考虑,优选出合适的风速条件。图7(c)为无加热系统下光谱仪底座温度随风速变化曲线,可看出入口风速为0.2 m/s~0.6 m/s时,底座平均温度随风速变化显著,入口风速为0.8 m/s~2 m/s时温度变化趋于缓和,温差略微上升。



(a) 入口风速0.2 m/s下底座温度分布



(b) 入口风速1.5 m/s下底座温度分布



(c) 底座最高、低温度随风速变化图

图7 无加热系统时不同风速对光谱仪温度场分布的影响

Fig. 7 Influence of different wind speeds on temperature field distribution of spectrometer without heating system

为保证振动小,变形小,电子器件良好运行,初选风速为0.8 m/s工况进行结构仿真,该工况底座最高温度为39.859℃,最低温度为36.103℃。由

于垂直底座水平面的方向变形不会影响光谱仪分辨性能,故可忽略此方向的变形。图8展示了该热工况沿底座水平2个垂直方向热变形图。将热变形影响引入光路仿真,见图1(b)所示,热变形量 $i$ 、 $j$ 分别为0.056 mm、0.074 mm。由于该光谱仪为多通道光谱仪,具有多个信号采集装置,因此具有多个热变形量 $k$ 。为保证光谱仪达到分辨率要求, $k$ 选取最大值0.073 mm进行光学仿真。由图3可知,特征谱线在200 nm~313.5 nm处分辨率最低,选择该范围谱线进行点列图分析,分析结果如图9所示。该热工况下多数谱线分辨率良好,仅有边缘谱线200.2 nm处相差0.2 nm的谱线点列图位置十分靠近,分辨率较差,但是,由于 $k$ 取最大值,其与200.2 nm、253.65 nm处 $k$ 值所处位置不对应,可认为热变形后该工况仍能满足设计要求,因此,选择该风速为优化工况并进一步仿真。

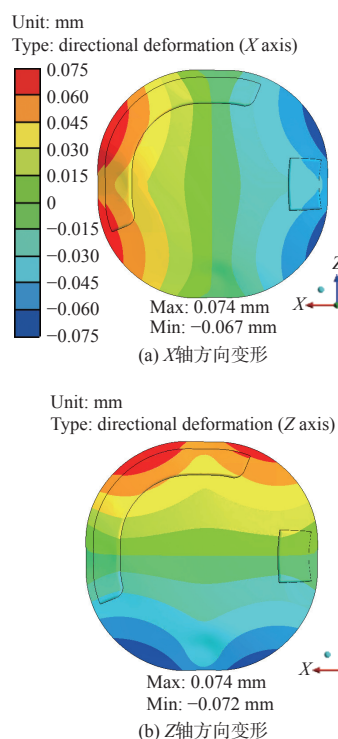


图8 无加热系统0.8 m/s入口风速时水平面方向热变形图  
Fig. 8 Thermal deformation diagram in horizontal direction at inlet wind speed of 0.8 m/s without heating system

### 3.2 加热方式选择

添加加热系统有助于降低系统热平衡所需时间,降低光谱仪整体温差有助于信号采集装置与理想谱面的差距值更加均匀,便于后续调整采集装置整体位置,从而提高成像品质。为降低热平衡所需时间及光谱仪整体温差,本文对不同加热

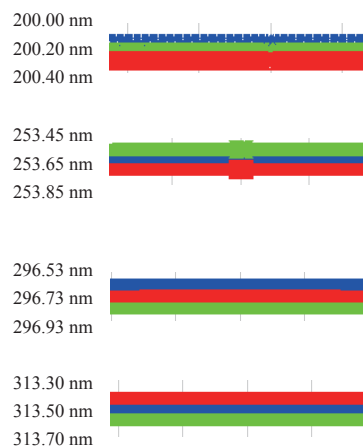


图9 无加热系统0.8 m/s入口风速时200 nm~313.7 nm谱线范围点列图

Fig. 9 Spot diagram of spectral line range of 200 nm~313.7 nm at inlet wind speed of 0.8 m/s without heating system

系统下的光谱仪进行了热仿真研究。由于无加热系统时0.8 m/s风速下底座最大温度为39.859℃,选择40℃作为不同加热系统的恒温加热面。图10给出了无加热、底层式加热、四周环绕式加热及顶层式加热4种方式在0.8 m/s风速时的温度分布。图10结果显示,4种加热方式的温度云图结构基本一致,表明底座温度分布主要受到发热器件CCD的影响,加热系统对底座温度分布仅起到调节温度的作用。四周环绕式加热方式底座温差相较于无加热系统降低了0.054℃,但总体平均

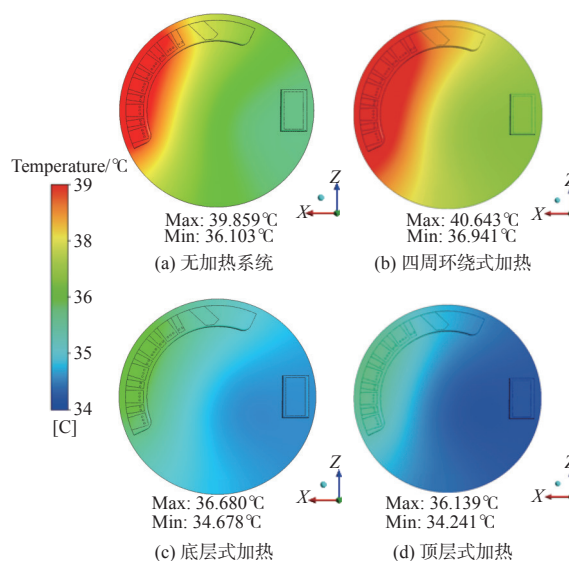


图10 不同加热系统光谱仪温度场分布图

Fig. 10 Temperature field distribution diagram of spectrometer with different heating systems



温度上升,不利于光谱仪性能发挥。底层式及顶层式加热方式总体温度比无加热系统低,说明这两种热工况下达到稳态时相当于散热面,因为在无加热系统情况下发热器件 CCD 会通过空气将热量传递到顶层式加热系统加热面所处位置,而顶层式加热系统的加热面设置为恒定 40 ℃ 不受 CCD 的影响,这比无加热系统相同位置的温度低,相当于散热面,使底座整体温度下降。由于底层式、顶层式加热系统的加入,温度梯度变小,两者温差均低于无加热系统,无加热系统温差为 3.756 ℃,底层式加热系统温差为 2.002 ℃,顶层式加热系统温差为 1.898 ℃。因此选择整体温度及温差较低的顶层式加热方式作为优化工况,并对此进行结构仿真。

热变形仿真结果如图 11 所示。图 11 中热变形量  $i$ 、 $j$ 、最大值  $k$  分别为 0.057 mm、0.030 mm、0.035 mm。由图 9 可知,200.2 nm、253.65 nm 谱线分辨率低,挑选两者进行点列图分析,具体分析结果如图 12 所示。分析结果表明,加入本文给出的加热系统依旧能满足分辨率设计要求。

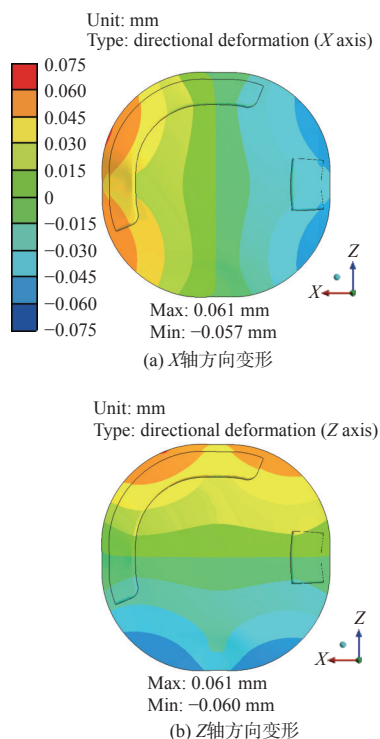


图 11 顶层式加热 0.8 m/s 入口风速时水平面方向热变形图

Fig. 11 Thermal deformation diagram in horizontal direction at inlet wind speed of 0.8 m/s with top-layer heating system

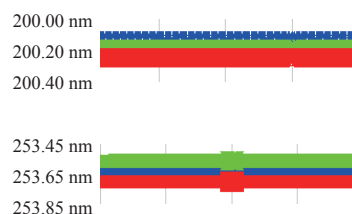


图 12 顶层式加热 0.8 m/s 入口风速时 200 nm~313.7 nm 谱线范围点列图

Fig. 12 Spot diagram of spectral line range of 200 nm~313.7 nm at inlet wind speed of 0.8 m/s with top-layer heating system

## 4 结论

本文依据设计要求设计了探测范围为 200 nm~450 nm,全波段分辨率不低于 0.2 nm,整体光学结构尺寸小于 400 mm × 500 mm 的罗兰圆光谱仪,利用 Zemax 仿真对性能进行了验证,并基于耦合光、热、结构模拟对多通道罗兰圆型光谱仪光室热工况开展了优化研究。初始无加热及入口风速时,光谱仪底座温度、温差随时间不断增加,难以达到热平衡,通过添加光室入口风速 (0.8 m/s) 和加热方式 (顶层式加热),光谱仪的整体温度降至 34.241 ℃~36.139 ℃,光学器件截距总热变形量降至 0.122 mm。光学仿真结果表明,在此变形量下该光谱仪依旧能分辨波长相差 0.2 nm 的光束。

## 参考文献:

- [1] 周树道, 马忠良, 王敏. Zemax在透射仪测量光路准直系统设计中的应用[J]. 微型机与应用, 2016, 35(22): 92-94.
- [2] ZHOU Shudao, MA Zhongliang, WANG Min. Application of Zemax in the design of optical alignment system for measuring optical path with transmission instrument[J]. Microcomputers and Applications, 2016, 35(22): 92-94.
- [3] 李学青, 王双保, 王林月. 基于STM32和CPLD的小型化近紫外CCD光谱仪[J]. 仪表技术与传感器, 2016(2): 18-20.
- [4] LI Xueqing, WANG Shuangbao, WANG Linyue. Miniaturized near-ultraviolet CCD spectrometer based on STM32 and CPLD[J]. Instrument Technique and Sensor, 2016(2): 18-20.
- [5] 王伟. 面向微型傅里叶变换光谱仪的电热式MEMS微镜关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.

- WANG Wei. Research on key technology of electro-thermal MEMS micromirror for micro Fourier transform spectrometer[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2017.
- [4] XIA Guo, QU Bixiang, LIU Peng, et al. Astigmatism-corrected miniature czerny-turner spectrometer with free-form cylindrical lens[J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(8): 27-30.
- [5] 黄良坤, 温泉, 温志渝, 等. 微型紫外光谱仪分析系统的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(5): 272-278.
- HUANG Liangkun, WEN Quan, WEN Zhiyu, et al. Research on micro uv spectrometer analysis system[J]. Progress in Laser & Optoelectronics, 2020, 57(5): 272-278.
- [6] 张波, 温志渝. 微型光纤光谱仪的研制及性能测试[J]. 半导体光电, 2007(1): 147-150.
- ZHANG Bo, WEN Zhiyu. Development and performance test of a micro fiber spectrometer[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2007(1): 147-150.
- [7] 徐挺, 吕丽军. 极紫外光谱仪光学系统的优化设计[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2646-2651.
- XU Ting, LYU Lijun. Optimal design of extreme ultraviolet spectrometer optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2646-2651.
- [8] 郭晓龙. 基于面阵CCD的微型紫外光谱仪设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- GUO Xiaolong. Design of micro UV spectrometer based on array CCD [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [9] 罗海燕, 施海亮, 李志伟, 等. 温度对星载空间外差干涉型光谱仪性能的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(9): 2578-2581.
- LUO Haiyan, SHI Hailiang, LI Zhiwei, et al. Effect of temperature on performance of space-borne heterodyne interferometer spectrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(9): 2578-2581.
- [10] 张军强, 颜昌翔, 蔺超. 温度对星载成像光谱仪谱线漂移的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 266-272.
- ZHANG Junqiang, YAN Changxiang, LIN Chao. Effect of temperature on spectral line drift of space-borne imaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(5): 266-272.
- [11] 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): 307-313.
- 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): 307-313.
- [12] 邹诚, 朱建钢, 汤浩波. 火花直读光谱仪的选型探讨[J]. 冶金自动化, 2007(2): 33-34.
- ZOU Cheng, ZHU Jiangang, TANG Haobo. Discussion on the selection of spark direct reading spectrometer[J]. Metallurgical Automation, 2007(2): 33-34.
- [13] 陈希. CCD火花直读光谱仪光机结构设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2016: 8-9.
- CHEN Xi. Optical machine structure design of CCD spark direct reading spectrometer [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016: 8-9.
- [14] 梁凤薇. 多通道快速光谱测试系统及其应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- LIANG Fengwei. Multi-channel fast spectrum measurement system and its application [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [15] 吴骥. 微型Czerny-Turner光栅光谱仪的光学设计与分析[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- WU Su. Optical design and analysis of micro Czerny-Turner grating spectrometer [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [16] 杜斌, 鲁燕萍, 任含玉. 基于ANSYS的内置加热子的陶瓷加热器温度场分析[J]. 真空电子技术, 2018(5): 41-44.
- DU Bin, LU Yanping, REN Hanyu. Temperature field analysis of ceramic heater with built-in heater based on ANSYS[J]. Vacuum Electronics, 2018(5): 41-44.
- [17] 李欢, 胡亮, 孟祥福, 等. 基于ANSYS Workbench的光学探测系统热-结构仿真分析[J]. 红外技术, 2020, 42(12): 1141-1150.
- LI Huan, HU Liang, MENG Xiangfu, et al. Thermal structure simulation analysis of optical detection system based on ANSYS Workbench[J]. Infrared Technology, 2020, 42(12): 1141-1150.