

文章编号 1004-924X(2024)07-0966-10

基于中红外波段的烷烃浓度遥测光学系统

殷亮¹, 邢志明¹, 朱科¹, 苗玉¹, 姜萌³, 单新治^{1,2*}, 高秀敏¹

(1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;

2. 上海理工大学 健康科学与工程学院, 上海 100080)

3. 北京航天控制仪器研究所, 北京 100080)

摘要: 为了实现对烷烃气体浓度的大范围灵活检测, 提出一种基于卡塞格林系统的中红外遥测遥感的方法。对该光学系统的发射模块、接收模块和探测模块进行整体设计研究, 基于卡塞格林系统结合 3 464 nm 的中红外光源完成对烷烃浓度遥测遥感光学系统的设计。该光学系统需要实现对 25~100 m 大范围内目标的测量, 设计了 25 cm 口径的光学遥测系统。针对卡塞格林系统存在光信号丢失的问题, 采用透射式非球面准直结构, 可以实现对不同距离目标的调焦; 针对口径过大引起的视差问题, 采用发射接收同轴的方式来消除较大的视差。实验结果表明, 本系统能够对 25~100 m 的目标进行测量。主镜和次镜镀有中红外增强金膜, 使系统的稳定性得到了显著提升。经过测试, 系统的总体发射效率为 86%, 接收效率为 75.8%。烷烃遥测遥感系统能够在大范围远距离上遥测气体浓度, 使用方便、测量迅速, 测量人员面对的风险低, 能够保证整体光学系统的稳定性及作业检测的安全性。

关键词: 遥测遥感; 烷烃浓度测量; 中红外光; 卡塞格林系统

中图分类号: TN215 文献标识码: A doi: 10.37188/OPE.20243207.0966

Remote optical system for measuring alkane concentration based on mid-infrared band

YIN Liang¹, XING Zhiming¹, ZHU Ke¹, MIAO Yu¹, JIANG Meng², SHAN Xinzhi^{1*}, GAO Xiumin¹

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

2. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200082, China;

2. China Academy of Aerospace Electronics Technology, Beijing 100080, China)

* Corresponding author, E-mail: sxz@usst.edu.cn

Abstract: To enhance the detection of alkane gas concentrations across a broad spectrum, this study introduces a mid-infrared telemetry and remote sensing approach utilizing the Cassegrain system. The design of the optical system's transmitting, receiving, and detecting modules was explored. Utilizing a 3 464 nm mid-infrared light source in conjunction with the Cassegrain system, an optical system for alkane concentration telemetry and remote sensing was developed. To accommodate target measurements within a 25-100 m range, an optical telemetry system was crafted with a 25 cm diameter. To counteract optical signal loss

收稿日期: 2023-11-30; 修订日期: 2023-12-25.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 62305222, No. 62022059, No. 62375183)

in the Cassegrain system, a transmission aspheric collimation structure was employed, enabling target focusing at varying distances. To address issues arising from the system's large aperture, a co-axial transmission and reception strategy, reducing disparity were implemented. The system can accurately measure targets within the 25-100 m range. Both primary and secondary mirrors were coated with a mid-infrared enhanced gold film, significantly boosting system stability. Testing reveals the system's overall transmission efficiency at 86%, with a reception efficiency of 75.8%. This alkane telemetry and remote sensing system facilitates remote gas concentration measurement over extensive ranges and distances, offering convenience, rapid measurement, and enhanced field safety. It ensures the optical system's stability and operational safety.

Key words: telemetry and remote sensing; alkane concentration measurement; mid-infrared light; Cassegrain system

1 引言

国内外研究吸收光谱气体遥测技术已有几十年的历史,检测方法包括传统的电化学法、火焰光度法、气相色谱法以及激光吸收光谱法^[1]。传统的电化学法、火焰光度法和气相色谱法等手段只能在近距离对气体进行检测,使用不方便、耗费时间长,在探测腐蚀性和爆炸性气体时更加困难,测量人员面临着较高的危险。相比较而言,激光吸收光谱法通过使用激光束沿光路传输后的强度变化,或基于激光对目标气体的辐射吸收而产生的吸收谱线来测量气体浓度^[2],能够在远距离对气体进行遥测,使用方便、测量迅速,测量人员面对的风险很低,目前已经成为最具发展前景的气体检测技术。

吸收光谱气体检测技术主要分为两类:不通过外差而直接根据接收信号获取吸收线的直接检测技术,以及通过外差先获取外差信号再进行处理获取吸收线的外差检测技术^[3]。外差检测技术能够对返回信号进行放大,面对较弱反射光能够实现更长的检测距离及更低的检测限^[4]。相对于外差光谱技术,直接检测技术虽然光谱分辨率较低、探测灵敏度不高,但其结构相对简单,成本低,可以在几米到几十米的范围内通过非合作目标反射对气体进行遥测^[5],适合设备体积小、低成本的气体被动检测系统。

红外遥测遥感是近几年兴起的一种高技术手段^[6],它可以在事故现场远距离、快速给出危险、有毒、有害云团的各种相关化学和物理信息^[7]。本文采用激光打到目标背景(墙体、地面、

管道等)后形成的回波反射信号进行泄漏气体遥测技术方案,设计反射式大口径光学系统。通过合理选取光学器件,成功研制大口径、轻量型中红外望远收发光学系统,实现对25~100 m内目标的成像。

2 系统工作原理与指标

2.1 系统工作原理

系统总体设计结构如图1所示。中红外 ICL 激光器发出波长为 3 400 nm 的光束(功率为 15 mW, 散射面 $W \times H = 9 \mu\text{m} \times 3 \mu\text{m}$), 经扩束准直系统处理陆续到达反射镜1和反射镜2, 经反射镜2偏折的光束到达远处, 随后携带烷烃气体信息通过卡塞格林系统依次到达主镜和次镜, 最终由探测模块接收。

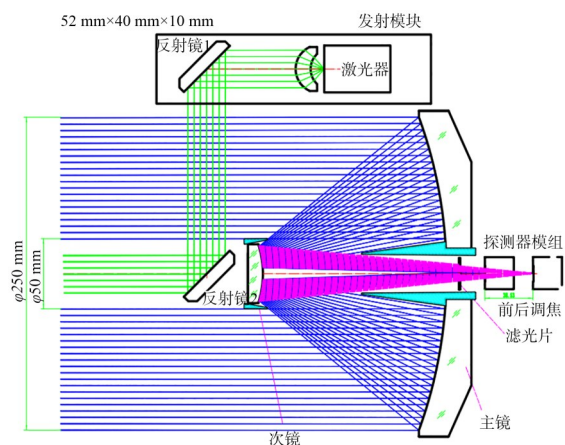


图1 烷烃浓度遥测光学系统的总体结构

Fig. 1 Optical overall structure of alkane concentration remote sensing measurement system

2.2 技术指标

本文利用激光照射目标背景后产生的回波反射信号来实现泄漏气体的遥测,设计的反射式大口径光学系统全部采用国产化设备,成本可控。通过合理选择光学器件,实现了大口径、轻量型的中红外望远收发光学系统。该系统的技术指标如下:(1)镜头口径 ≥ 25 cm;(2)发散角 ≤ 1.5 mrad;(3)遥测设计距离为 25~110 m;(4)滤波片在 3 400~3 500 nm 内的透过率 $\geq 90\%$;(5)带外通过率 $\leq 0.3\%$;(6)镜头接收效率 $\geq 87\%$;(7)质量 ≤ 7.5 kg。

3 烷烃检测系统设计

3.1 硬件构成

光学系统主要分为发射模块、接收模块和探测模块 3 大模块。该系统采用透射式非球面准直镜实现对发射模块的设计,采用卡塞格林望远系统实现对接收模块的设计。

3.2 系统发射模块

3.2.1 系统发射模块原理

激光扩束准直系统^[8]用于将光束从一个较大的角度限制到一个较小的角度范围内,需要采用透镜、反射镜或光学棱镜等光学元件来控制光束的传播方向和角度。透射式非球面准直透镜及调节结构如图 2 所示。

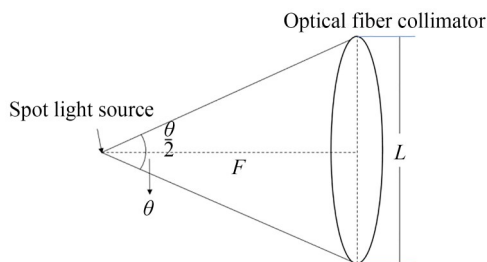


图2 透射式非球面准直透镜及调节结构

Fig. 2 Transmission aspheric collimator lens and adjustment structure

激光是由一束高度相干的光波组成的,发散角度较小。准直透镜是一种具有透镜形状的光学器件,其表面曲率能够使光线发生折射。激光束通过准直透镜时发生折射,使激光束的传播方向调整为平行光束。

在扩束准直系统中^[9],激光通过一个透镜或反射镜将这个点上的光束重新发散成一个较小的角度,从而将光束从一个较大的角度限制到一个更小的角度范围内。

准直透镜的曲率可以根据式(1)进行选择,以实现准直效果。调整后的平行光束可以更好地传输和聚焦,提高激光系统的效率和性能。

$$L = 2F \times \tan\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad (1)$$

其中: L 为准直镜口径, F 为准直径焦距, θ 为发散角。

3.2.2 系统发射模块设计

准直透镜安装在一个铝基座上,铝基座由 4 根钢棒做导向。计算准直透镜因温度的变化导致的离焦量,由此设计钢棒和铝基座的尺寸,使二者随温度的变化正好补偿准直透镜的离焦,保证发射组件的环境适应性。

透射式非球面准直透镜及调节结构如图 3 所示,准直光束经过反射镜 1、反射镜 2 反射后进入待测气体区域。其中,反射镜 1、反射镜 2 为镀有增强金膜的高反射透镜。两个反射镜的镜架均在同一条轴线上,并且两镜片具有相同的倾斜角度。反射镜 1 粘接在一个紧凑型的不锈钢挠性调整架上,此调整架采用挠性枢轴和精密调节螺钉,保证反射镜的机械稳定性,使用内六角扳手调节球形驱动器可实现轻松的调节。

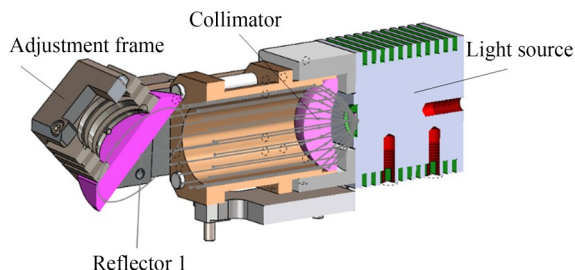


图3 透射式非球面准直透镜及调节结构

Fig. 3 Transmission aspheric collimator lens and adjustment structure

反射镜 2 粘接在一个固定底座上,如图 4 所示。底座固定在主光学系统的次镜基座上。为了降低次镜基座的质量,反射镜 2 没有设置调节机构,装配时通过机械公差定位,残余的角度误差通过反射镜 1 的调节架进行补偿。

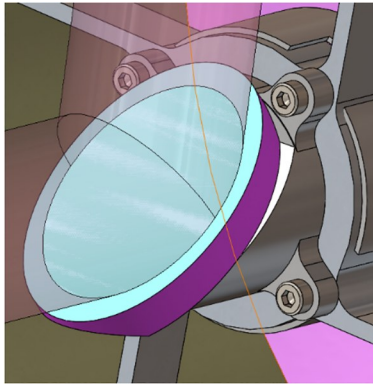


图 4 反射镜 2 及其固定结构
Fig. 4 Reflector 2 and its fixed structure

所选择的激光二极管的发光尺寸为 $9\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$,慢轴发散角(FWHM)为 35° ,快轴发散角(FWHM)为 55° 。发散角为半高全宽,激光按高斯分布,其实际发散角要大得多,因此应尽量提高发射镜的尺寸,否则会导致截光问题。

发射镜的焦距为 $20\ \text{mm}$,通光孔径为 $30\ \text{mm}$,代入式(1)得到激光光斑尺寸引起的发散角约为 $0.45\ \text{mrad}$ 。再考虑衍射产生的发散角约为 $0.35\ \text{mrad}$,则总发散角在 $0.8\ \text{mrad}$ 左右,满足指标 $<1.5\ \text{mrad}$ 的要求。

图 5 为发射镜设计,其材料选用对温度相对不敏感的硒化锌^[10],其中一个面为非球面,采用单点金刚石加工工艺制造。硒化锌对可见光也有一定的透过率,给装调过程增加一定的便利性。

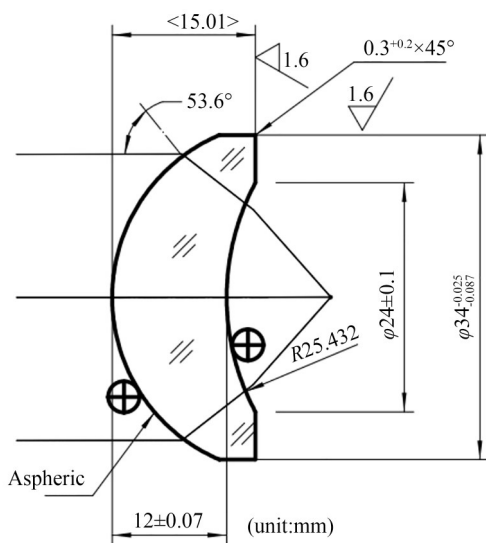


图 5 发射镜设计
Fig. 5 Design of emission mirror

激光准直系统发射镜的发射效率达 97% ,反射镜 1 和反射镜 2 分别镀有增强金膜,发射效率达 98% ,高斯光束通过率达 93% ,整个系统的发射效率为 86% ,满足指标的光学接收要求。

3.3 系统接收模块

3.3.1 工作原理

卡塞格林系统是一个反射式两镜系统^[11],如图 6 所示,它由主镜和次镜组成。主镜为中心开有一个通孔的凹面反射镜,次镜为凸面反射镜。主镜反射面曲面为抛物面,次镜反射面曲面为双曲面。根据几何原理^[12],主镜抛物面的焦点应与次镜双曲面的虚焦点重合于图中 F' 点,成像于双曲面的实焦点 F 处。被观测物体的光线从左侧射入,入射光线首先照射在主镜反射面上,经主镜反射到达次镜,再经次镜二次反射,光束聚焦,并从主镜中心通孔处穿过,成像于主镜背面的 F 点处^[13]。

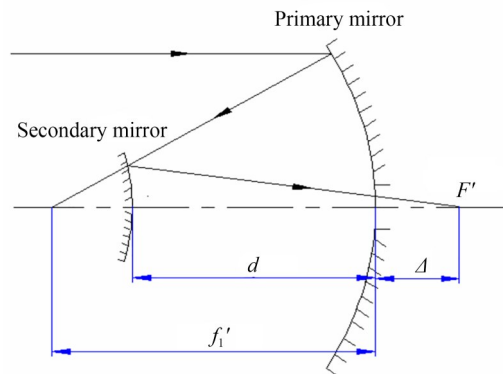


图 6 经典的卡塞格林系统示意图
Fig. 6 Schematic diagram of classic Cassegrain system

卡塞格林光学系统的初步设计如下:根据系统所要求的焦距 f' 、次镜的放大倍率 β (等于系统焦距 f' 与主镜焦距 f_1' 之比)、系统的中心遮拦比 α 和焦点的伸出量 Δ (即主镜顶点到系统总焦点的距离)来确定主镜与次镜的顶点曲率半径 R_1, R_2 , 以及它们之间的距离 d ^[14]。

系统焦距 f' 、焦点的伸出量 Δ 由总体设计提出,次镜放大倍率 β 与系统遮拦比 α 的关系如下:

$$\alpha = [f' + \Delta\beta / (\beta - 1)]. \quad (2)$$

确定 α, β 后,主镜与次镜的顶点曲率半径

R_1, R_2 , 以及它们之间的距离 d 如下:

$$R_1 = 2 \times f' / \beta, \quad (3)$$

$$R_2 = \alpha \beta R_1 / (\beta + 1), \quad (4)$$

$$d = f'(1 - \alpha) / \beta. \quad (5)$$

卡塞格林光学系统的优点在于没有色差, 适用光谱范围宽, 且利用主次镜抛物面和双曲面的几何原理, 可避免系统球差, 并能使利用该系统设计的镜头结构更加紧凑。

3.3.2 系统接收模块设计

针对卡塞格林望远系统焦距较长、应用的波段较宽以及视场较小等特点^[15], 本设计采用卡塞格林望远系统加透镜组来构成折反射式望远系统。

为达到 250 mm 主镜镜头口径和 1.5 mrad 的发散角要求, 本系统采用常规的卡塞格林光路; 为减少背景杂散光, 接收系统的视场应该稍大于发射视场。发射光束的发散角在 0.8 mrad 左右, 因此接收设备 1 mrad 较为合适。根据探测器直径为 1 mm, 则接收镜的焦距为 1 000 mm。

探测器前面已经集成一片砷化镓超半球透镜^[16], 其接收面积相对于 1 mm² 的感光面会增大, 从而可以增大视场, 需在最终装调时测试。设计时可以在探测器前端设计一个可更换的光阑 (1 mm² 左右), 根据接收信号大小及背景噪声优化光阑的尺寸。根据探测器直径 1 mm 计算, 则接收镜的焦距为 1 000 mm。

图 7 为接收模块的设计图纸, 以铝合金作为材料基底, 其中 S1 为抛物面, S2 为双曲面。给每个镜面镀增强型金反射膜, 反射率大于 98%。经

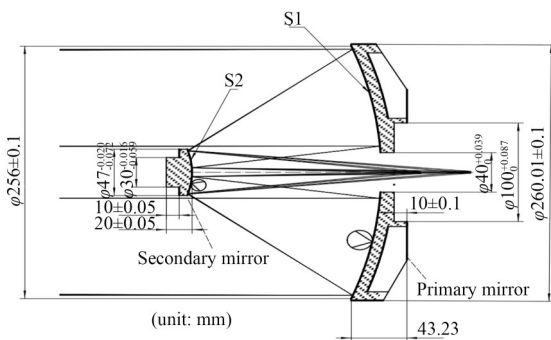


图 7 接收光路

Fig. 7 Receiving optical path

过主镜次镜后系统镜头的接收效率达 89%, 满足指标的光学接收要求。

4 系统测试分析

基于烷烃遥测系统, 对激光准直系统和卡塞格林系统进行仿真分析及测试。

4.1 发射系统分析

发射部分系统结构如图 8 所示, 系统点列图如图 9 所示。各个视场下的斑 RMS 半径已经在艾里斑之内, 说明弥散斑的参数已经达到衍射极限。

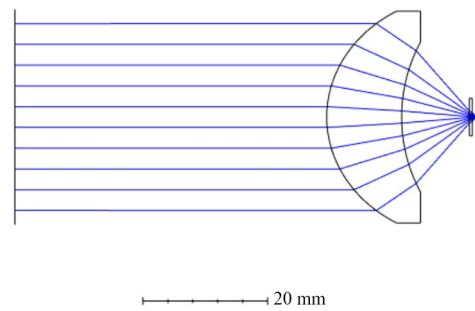
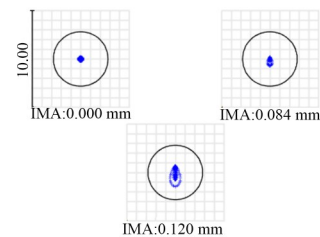


图 8 激光准直系统结构

Fig. 8 Structure of laser collimation system



Surface: IMA		Spot diagram	
Lens has no title, 2023/11/22			
Unit:	μm	Airy spot radius: 2.818 μm. Legend items refer to wavelength	
Field:	1 2 3	Zemax	
RMS radius:	0.176 0.224 0.558	Zemax opticstudio 19.4	
GEO radius:	0.215 0.699 1.432	Transmission V4 ZnSe ZMX	
Scale bar:	10 Reference: Chief ray	1 Structure 3	

图 9 发射系统点列图

Fig. 9 Spot diagram of launch system

对发射部分的激光准直系统进行测试, 得到不同位置的发射光斑示意图, 如图 10 所示。表 1 为发射系统不同调焦距离时目标的光斑尺寸, 由表可知, 发射模块满足系统指标发散角 < 1.5 mrad。

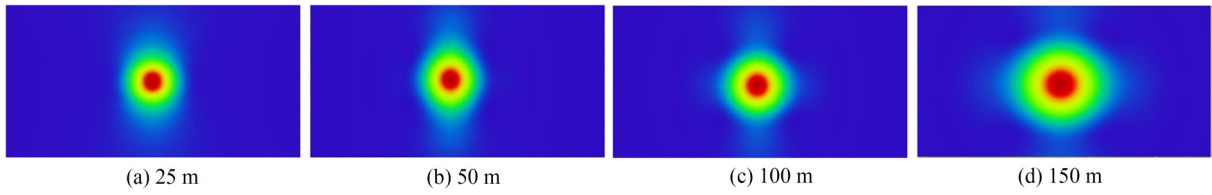


图 10 不同位置的发射光斑示意图

Fig. 10 Schematic diagram of emission spot at different positions

表 1 不同调焦距目标上的光斑尺寸

Tab. 1 Spot size on targets with different focusing distances

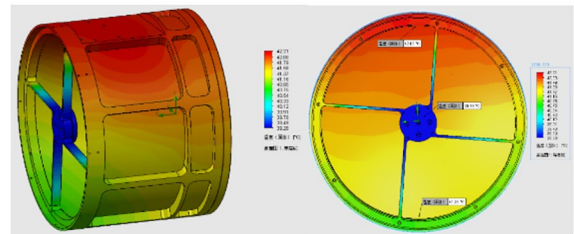
距离/m	光斑直径 (调焦距离:无穷远)/mm	换算成 接收角/mard	光斑直径 (调焦距离:70 m)/mm	换算成 接收角/mard
150	136	0.91	128	0.86
100	94	0.94	76	0.76
90	85	0.94	66	0.74
70	73	1.04	49	0.70
50	60	1.20	42	0.84
40	53	1.33	37	0.93
30	42	1.40	35	1.20
20	27	1.35	29	1.45

4.2 接收系统热力分析

接收系统的双反镜片和总体机械框架均采用 6061 铝合金材料,实现消热设计^[17],以保证系统在总体温度变化时,不会引起光学系统的离焦现象,从而保证光学成像质量和光学系统性能稳定。但当系统总体出现温度梯度时,还是会影响光束聚焦性能,如温度剧烈变化或太阳辐照等情况。

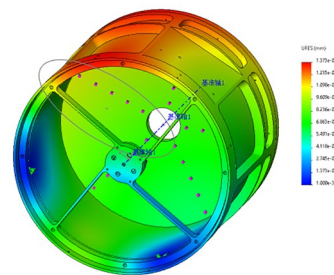
太阳辐照的模拟条件如下:太阳辐射功率为 $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$,照射方向为正上方,环境温度为 $30\ ^\circ\text{C}$ 。由图 11 可以看出,由于太阳直接照射镜筒,整个系统产生了较大的温度梯度^[18],主镜上的温度梯度约为 $0.7\ ^\circ\text{C}$;而由于次镜的支撑结构较薄,传导能力弱,次镜的温度最低为 $39.29\ ^\circ\text{C}$ 。

图 12 为根据上述所给出的温度和位移变化模拟得到的聚焦光斑尺寸。由图可以看出:加载温度变化后,聚焦光斑尺寸略有增加(约增加 $20\ \mu\text{m}$ 左右),与 $1\ \text{mm}$ 的光电探测器感光面尺寸相比可以忽略。



(a) 温度分布

(a) Temperature distribution



(b) 位移分布

(b) Displacement distribution

图 11 太阳辐照模拟分析

Fig. 11 Simulation analysis of solar irradiation

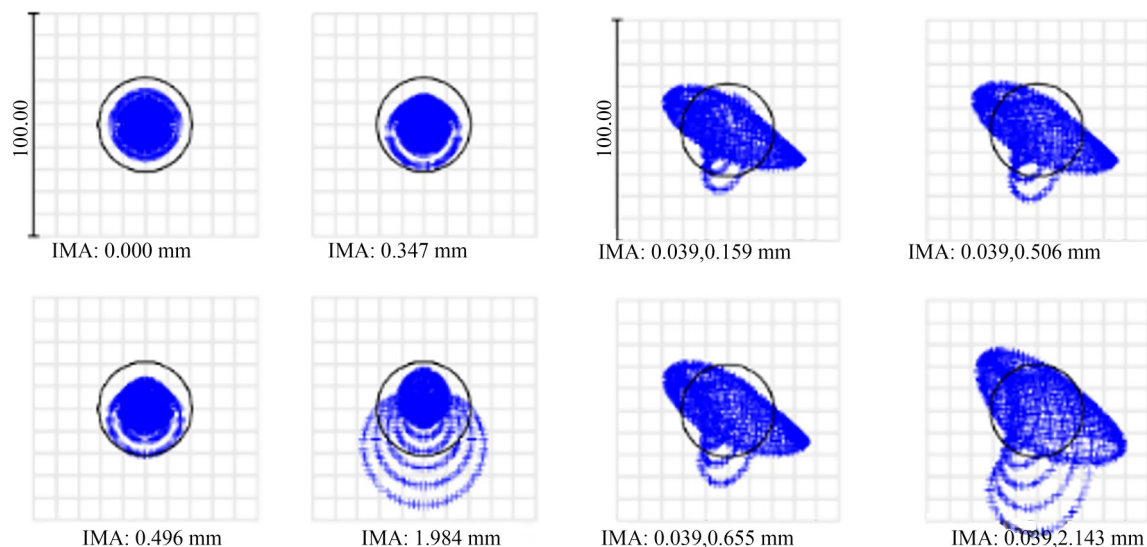


图 12 理想情况下及加载温度变化后光学系统的点列图

Fig. 12 Focus point column diagram of optical system under ideal conditions and after loading temperature changes

4.3 系统应力分析

本系统属于收光系统,装夹精度的要求较低,但仍然采取一定措施,降低安装应力。

主镜采用单点金刚石车削方式制造,采用背部三点柔性支撑结构方式。图 13 为加载重力前后主镜的变形图,由图可以看出,主镜的大部分形变由小角度倾斜引起($0.3 \mu\text{m}$),而像散、球差一类的变形可以忽略。

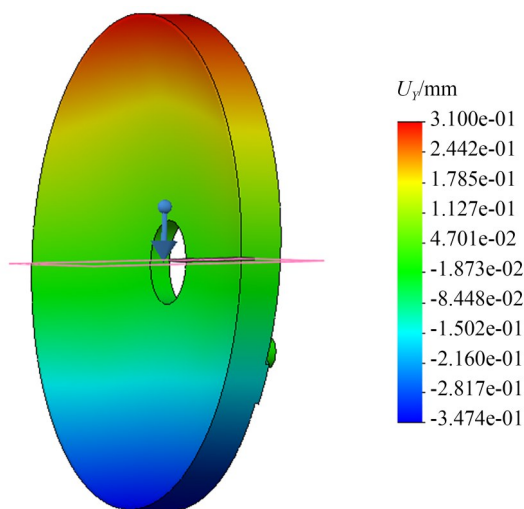


图 13 主镜受力分析

Fig. 13 Force analysis of primary mirror

4.4 系统测试结果

对系统指标进行测试,首先在实验室采用大电流驱动与控制系统(Newport),与高精度锁相检测设备(苏黎世 MFLI-500)和平行光管,对不同距离信号的检测精度进行对比,用于对镜头指标的验收以及后续测试自研高精度解调电路和自研激光驱动模块的指标水平,如图 14 所示。

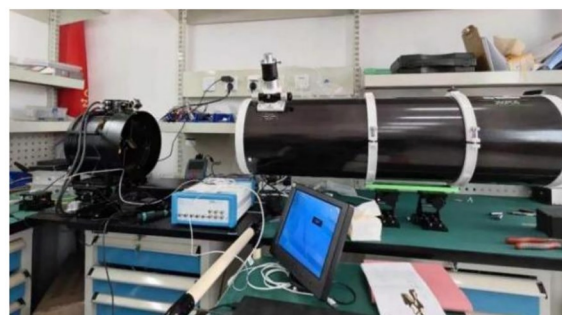


图 14 采用平行光管的实验室指标测试

Fig. 14 Laboratory indicator testing using collimator

测试平行光管模拟像点距离 100 m 时的指标,图 15 所示为甲烷吸收信号和谐波信号,采用锁相参数为 500 Hz-3 倍放大-AC-Diff-3dB700,噪声为 72,信号为 $800 \mu\text{V}$,信噪比为 11.1,甲烷检测限为 $45 \mu\text{m/m}$ 。图 16 所示为乙烷吸收信号和谐波信号,采用锁相参数为 -500 Hz-3 倍放大

-AC-Diff-3 dB700, 噪声为 73, 信号为 $950 \mu\text{V}$, 信噪比 13, 检测限为 $39 \mu\text{m}/\text{m}$ 。

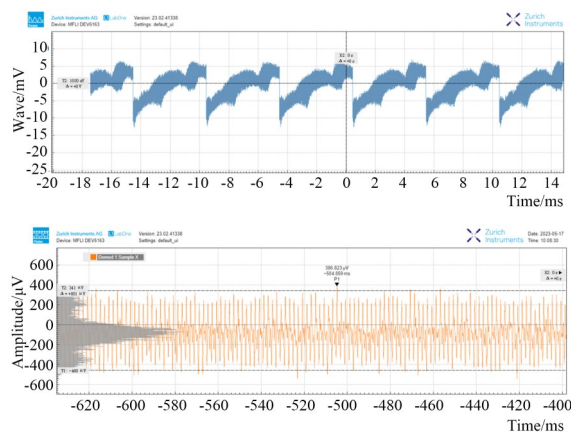


图 15 甲烷吸收信号和谐波信号

Fig. 15 Methane absorption signal and harmonic signal

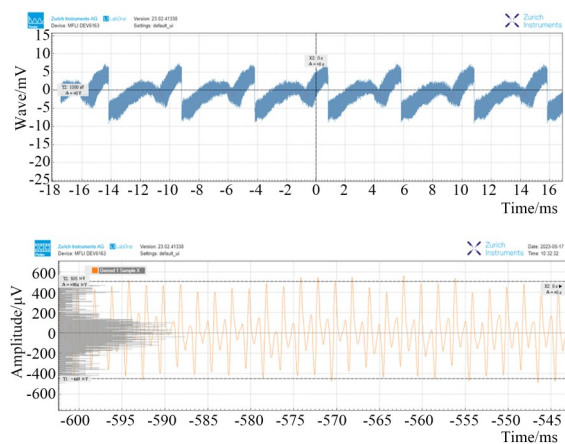


图 16 乙烷吸收信号和谐波信号

Fig. 16 Ethane absorption signal and harmonic signal

为提升遥测距离并且不降低检测限, 测试末端采用空心反射器实现了户外 135.4 m 遥测距离的多组分测量。反射器实物如图 17 所示, 其精度为 0.02 mrad , 可以确保返回光偏差在镜头口径内, 经过验收测试, 遥测镜头的指标满足课题要求, 最终实现了遥测距离 $>100 \text{ m}$ 。验收目标分为两种场景, 一种是铝箔作为反射面, 距离达

到 100.5 m ; 一种是空芯反射器作为反射面, 在确保甲烷和乙烷的检测精度 $\leq 50 \mu\text{m}/\text{m}$, 遥测距离为 134.5 m 。



图 17 末端采用空心反射器

Fig. 17 Hollow reflector at terminal

5 结 论

为了实现烷烃气体浓度的大范围灵活检测要求, 本文提出了一种基于透射式非球面准直镜和卡塞格林系统的中红外遥测遥感方法, 完成对烷烃浓度遥测遥感光学系统的设计。主镜和次镜镀有中红外增强金膜, 系统稳定性得到显著提升。实验结果表明: 本方案充分考虑系统所需的各项技术指标以及工程稳定性要求, 经过测试, 系统总体发射效率为 86% , 接收效率为 75.8% , 能够实现 $25\sim 100 \text{ m}$ 范围内的烷烃气体浓度遥测。该装置具有使用方便、测量迅速和风险低等优势, 能够保证整体光学系统的稳定性及作业检测的安全性。

参考文献:

- [1] 余子威. 主动激光外差光谱气体遥测技术研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2021.

YU Z W. *Research on Remote Sensing Technology of Active Laser External Difference Spectrum Gas* [D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2021. (in Chinese)

- [2] LI J Y, YU Z W, DU Z H, *et al.* Standoff chemical detection using laser absorption spectroscopy: a review[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2771.
- [3] 王云云. 基于红外多光谱的有毒有害气体被动遥测方法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021. WANG Y Y. *Research on Toxic and Harmful Gas Telemetry Method Based on Infrared Multispectral* [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021. (in Chinese)
- [4] 郑为建, 余春超, 杨智雄, 等. 宽波段环境污染气体红外遥测技术研究[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(11): 1104002. ZHENG W J, YU CH CH, YANG ZH X, *et al.* Remote sense for environment pollution gases in wide infrared spectral range[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(11): 1104002. (in Chinese)
- [5] 张学军, 樊延超, 鲍赫, 等. 超大口径空间光学遥感器的应用和发展[J]. 光学精密工程, 2016, 24(11): 2613-2626. ZHANG X J, FAN Y CH, BAO H, *et al.* Applications and development of ultra large aperture space optical remote sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(11): 2613-2626. (in Chinese)
- [6] 李洪雨, 郭汉洲, 李俊霖, 等. 大口径红外光学系统透过率测量装置[J]. 光学精密工程, 2023, 31(12): 1752-1760. LI H Y, GUO H ZH, LI J L, *et al.* Transmittance measurement device of large-aperture infrared optical system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(12): 1752-1760. (in Chinese)
- [7] SUN J, DING J Y, LIU N W, *et al.* Detection of multiple chemicals based on external cavity quantum cascade laser spectroscopy[J]. *Spectrochimica Acta Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2018, 191: 532-538.
- [8] 冯志强. 紧凑型激光扩束与成像共孔径光学系统设计[D]. 苏州: 苏州大学, 2022. FENG ZH Q. *Design of Compact System for Laser Expanding and Optical Imaging System with Common Aperture* [D]. Suzhou: Soochow University, 2022. (in Chinese)
- [9] 王秀琳, 黄文财, 郭福源. 半导体激光束准直系统的研究[J]. 应用光学, 1999, 20(1): 1-5. WANG X L, HUANG W C, GUO F Y. Research on semiconductor laser beam collimation system[J]. *Journal of Applied Optics*, 1999, 20(1): 1-5. (in Chinese)
- [10] 张玉兰, 卢利平, 臧春和, 等. 硒化锌晶体加工工艺研究[J]. 硅酸盐学报, 2004, 32(5): 612-615. ZHANG Y L, LU L P, ZANG CH H, *et al.* Study on processing technology of ZnSe crystal [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2004, 32(5): 612-615. (in Chinese)
- [11] 钟英杰, 王根娟, 王明晓, 等. 基于卡塞格林原理的火焰自由基测量系统[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(5): 1044-1050. ZHONG Y J, WANG G J, WANG M X, *et al.* System based on Cassegrain optical principle applicable to measure chemiluminescence in flame [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2017, 51(5): 1044-1050. (in Chinese)
- [12] MA X J, YANG H J, WANG B, *et al.* An optimum structure design for Cassegrain optical system [J]. *Optik*, 2014, 125(3): 1423-1426.
- [13] 王根娟. 火焰自由基荧光强度测试系统的开发与研制[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016. WANG G J. *The Development of New Effective Systems Applicable to Measure Chemiluminescence in Flame* [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [14] 李婕, 明景谦, 卢若飞. 一种改进型的红外卡塞格林光学系统设计[J]. 红外技术, 2010, 32(2): 76-80. LI J, MING J Q, LU R F. Design of an ameliorating infrared cassegrain optical system [J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(2): 76-80. (in Chinese)
- [15] 王健, 张美君, 虞林瑶, 等. 卡塞格林系统结构与仿真[J]. 机电工程技术, 2022, 51(5): 84-86, 97. WANG J, ZHANG M J, YU L Y, *et al.* Cassegrain system structural design and simulation [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2022, 51(5): 84-86, 97. (in Chinese)
- [16] 张志杰. 砷化镓异质结太阳能电池的制备及光伏性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022. ZHANG ZH J. *Construction and Photovoltaic Performance of Gallium Arsenide Heterojunction Solar Cells* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [17] 曲锐, 郭惠楠, 曹剑中, 等. 可见-近红外无热化连续变焦光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(9): 3788/IRLA20210090. QU R, GUO H N, CAO J Z, *et al.* Design of visible-near infrared athermal continuous zoom optical

system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(9): 3788/IRLA20210090. (in Chinese)

- [18] 万岩, 陈云怡. 基于DBN耦合模型的太阳辐照度模拟[J]. 现代电子技术, 2023, 46(1): 79-84.

WAN Y, CHEN Y Y. Solar irradiance simulation based on DBN coupling model [J]. *Modern Electronics Technique*, 2023, 46(1): 79-84. (in Chinese)

作者简介:



殷亮(1989—),男,助理研究员,主要从事光学技术在检测和传感应用中的研究。E-mail: chengm@ciomp. ac. cn

通讯作者:



单新治(1987—),男,博士,主要从事光谱检测技术应用及痕量物质检测技术的研究。E-mail: chengm@ciomp. ac. cn