

文章编号 2095-1531(2014)06-0949-07

CO₂ 探测仪单通道光学系统设计验证方法

高明辉*, 郑玉权

(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:为验证 CO₂ 探测仪光学设计的合理性和可行性,采用单通道模拟样机,利用太阳光加漫反射板模式对大气光谱进行实验测试,并在实验室对单通道模拟样机进行光谱定标。利用光谱配准算法对两种方法得出的谱线位置进行匹配计算,结果表明:在吸收线深度稳定位置的配准峰值点偏差小于 0.006 nm,满足算法的精度要求。此种方法不仅验证了匹配算法的有效性,也验证了光学系统设计的合理性和可行性,为以后的光谱仪设计提供了理论与实验数据。

关键词:探测仪;单通道光学系统;漫反射板;光谱配准

中图分类号:TP722.3 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20140706.0949

Validation method of single-channel optical system design of CO₂ detector

GAO Ming-hui*, ZHENG Yu-quan

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

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

Abstract: The single-channel demonstration is adopted to validate the rationality and feasibility of CO₂ detector optical system. Atmosphere spectrum is tested by experiment with the mode of sun light and diffuser. The spectrum calibration of the single-channel demonstration is carried out in lab. The matching calculation of two spectral position obtained from above two ways is carried on by using spectral matching algorithm. The result shows that the absorption peak point deviation is less than 0.006 nm in the line depth stable position, which could meet accuracy requirement of algorithm. This way can not only verify the validity of the matching algorithm, but also the rationality and feasibility of optical system design. The research provides the theoretical and practical optical reference data for spectrometer design in the future.

Key words: detector; single-channel optical system; diffuser; spectrum matching

收稿日期:2014-09-21;修订日期:2014-11-24

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(No. 2010AA1221091001)

1 引言

全球气候的不断变化受到越来越广泛的关注,其产生的根本原因是二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、一氧化二氮(N₂O)和氟氯烃化合物(CFCs)等大气温室气体的排放不断增加^[1]。工农业生产排出大量废气、微尘等污染物质进入大气,这些气体都具有明显的温室效应。但对于温室气体的监测,主要依据该气体的发射光谱和吸收光谱的强弱。在波长1.594~2.08 μm范围内,CO₂和CH₄具有很强的吸收谱^[2],根据此特性进行相应的光学设计,以此来获得气体的谱线,通过谱线进行浓度的反演。一般地,在地面验证其光学系统的合理和可行性。国外TANSO(Thermal and Nearinfrared Sensor for carbon Observation)卫星光学载荷的光学测试采用在实验室搭建光学平台,光源采用波长为1.31 μm的激光二极管^[3],通过探测器进行测试。国内大多也是在实验室采用可调谐的激光器作为光源,通过搭建的光学系统和探测器实现特定光谱、光强度和反射率的测试。国外的单通道光学系统如美国的AIRS卫星采用卡萨格林的反射式光学结构,前端利用滤光片分光,反射镜片多达5片,结构如图1所示。

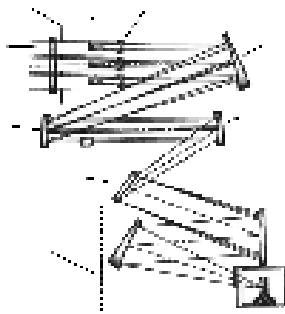


图1 美国AIRS卫星准直成像光路图

Fig.1 Collimator imaging optical path of AIRS satellite

国内设计结构主要采用非球面透镜方式,准直系统透镜数量仅为两片,结构简单,易于保证系统的成像质量,突破了传统的国外设计方式。随着科学应用需求的提高,绝对辐射定标验证是未来光谱仪星上定标的基本要求。由于内部参考标准定标光路只能从光谱仪光路中间某个部位切

入,不能进行全光路定标,因此无法实现绝对定标,只能对切入点之后的光路进行相对定标。如果在整个光路的最前方放置漫反射体,利用太阳作为定标参考标准,采用可展开收起的机械结构实现全光路定标,从而实现绝对辐射定标。另外,标准灯在轨期间自身性能会出现下降,也逐渐不满足光谱仪的辐射定标要求^[4,7]。因此,为保持地面与空间模拟的状态一致,采用太阳作为入射光源,也作为辐射参考标准,提出一种利用太阳光、漫反射板和探测器进行验证的方法。

2 太阳与漫反射板验证数据处理

太阳是一个高度稳定的光源。经地球辐射收支卫星(Earth Radiation Budget Satellite,ERBS)实测资料表明,从1984年到1999年的地球辐射量,太阳辐射的变化不超过0.2%。太阳的辐射总量近似为1365 W/m²,其中短波辐射量占99.5%,长波辐射占0.5%,太阳辐射的年变化情况如图2所示^[8-10]。

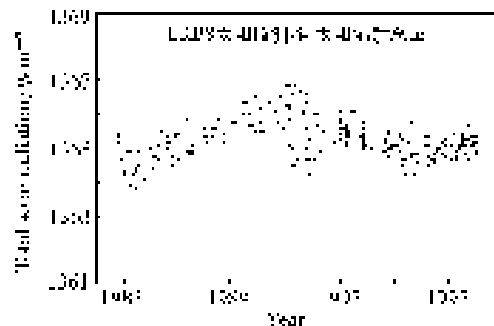


图2 ERBS记录的从1984到1999年的太阳辐射数据

Fig.2 Sun radiation data from 1984 to 1999 recorded by ERBS

太阳到达CO₂探测仪的辐射通量密度 $I_s(\lambda)$ 由下式定义:

$$I_s(\lambda) = e_0 I_m(\lambda), \quad (1)$$

式中: $I_m(\lambda)$ 为日地平均距离上的太阳光谱辐射通量密度, e_0 为地球轨道偏心率订正因子, e_0 的定义如下式所示:

$$e_0 = \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 = 1.000110 + 0.34221 \cos \Gamma +$$

$$0.001280\sin\Gamma + 0.000719\cos2\Gamma + 0.000077\sin2\Gamma, \quad (2)$$

式中, $\Gamma = \frac{2\pi(d_n - 1)}{365}$, r_0 为日地平均距离, r 为实际的日地距离, Γ 为日角(单位为弧度), d_n 为年当中的天数, 范围从 1(1月1日)到 365(12月31日)。

$I_s(\lambda)$ 也可采用式(3)简化计算载荷在不同时间实际接收的太阳辐射通量密度。

$$I_s(\lambda) = I_m(\lambda) \times [1 + 0.0167\cos(\frac{2\pi(d_n - 3)}{365})]^2. \quad (3)$$

通过卫星指向, 使在 CO₂ 探测仪与太阳直射入射方向相对固定的条件下, 漫反射板的辐射亮度 $L(\lambda, d_n)$ 可由下式计算^[11-15]:

$$L(\lambda, d_n) = I_s(\lambda, d_n) \times BRDF(\lambda, d_n) \times f(\alpha, \beta), \quad (4)$$

式中: $f(\alpha, \beta)$ 为漫反射板与太阳直射方向夹角的角度修正因子, α, β 分别为太阳直射光相对漫反射板的入射天顶角和入射方位角; $BRDF(\lambda, d_n)$ 为漫反射板双向反射分布函数。

根据下式即可完成对探测仪绝对辐射定标系数的在轨校验。

$$G_{orbit} = (DN_{orbit} - B)/L(\lambda, d_n). \quad (5)$$

漫反射板经老化实验后, 其太阳定标方位下的双向反射分布函数, 可通过现有反射率测量设

备进行监测, 同时记录监视探测器地面试验输出数值作为星上漫反射板衰减监测的先验数据。

3 探测器输出信噪比计算

太阳照射到漫反射板的反射光通过系统的, 照射到探测器上, 由探测器输出信噪比验证光学系统的设计是否合理和可行。

太阳在地球大气层边沿的辐照度为 1 358.79 W/m²。漫反射板与太阳入射方向成 45°, 因此太阳在漫反射板上的照度为:

$$E = 1358.79 \times \cos45^\circ. \quad (6)$$

漫反射板在探测器处的亮度为:

$$L = \rho E / \pi. \quad (7)$$

全波段漫反射板辐亮度: 214.084 6 W/m²/sr。

由上面的计算, 计算探测器处的光辐射通量。在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内, 探测器接收面处的辐照度为^[16]:

$$E = (L\pi R_2^2/l^2) / [1 + (R_2/l)^2], \quad (8)$$

探测器的有效面积为 A , 则 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波段内探测器接收的辐射通量为:

$$P_5 = ctEA, \quad (9)$$

$$SNR = P_5/NEP. \quad (10)$$

由以上公式计算出的探测器信噪比如表 1 所示。

表 1 采用太阳和漫反射板模式计算的探测器信噪比

Tab. 1 Detector SNR calculated through adopting the mode of sun and diffuser

模式	波段/nm	太阳 C	P ₅	SNR
太阳	718 ~ 818	0.090 4	1.6958 × 10 ⁻⁵	5.147 × 10 ⁴
漫反	1 510 ~ 1 710	0.028 0	4.4310 × 10 ⁻⁶	3.503 × 10 ⁵
射板	1 910 ~ 2 210	0.019 1	3.0226 × 10 ⁻⁶	1.051 × 10 ⁵

经过太阳和漫反射板计算的探测器信噪比, 能够满足系统技术要求, 采取太阳加漫反射板的方式是合理的, 也验证光学系统的合理性。

4 工作原理和组成

通过调整平台姿态, 使太阳光照射到漫反射

板上, 经漫反射板反射后进入遥感器, 由探测器得到需要的光谱曲线, 得到的曲线与 OCO 的比较^[17-19], 来验证系统的成像精度。验证方法的设备包括: 室外的漫反射板装置、车载五自由度调整台、带探测器的遥感器、以及后端的处理软件。其组成框图如图 3 所示。

其中, 验证的单通道的光学系统如图 4 所示。

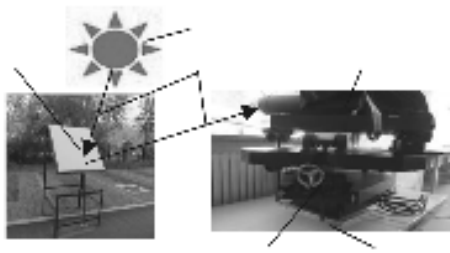


图3 单通道光学系统验证系统组成示意图
Fig.3 Sketch map of single-channel optics validation system

其中光学系统的透镜采用 JGS1 (熔石英) 材料。光学系统的公差分析,准直镜组偏心公差为 10";成像镜组偏心公差为 10";光栅的倾斜和旋转为 10"。准直镜系统中的准直透镜 1 到准直透镜 2 的间距在探测器工作时要求较高,间距偏差不得超过 $\pm 3 \mu\text{m}$;成像镜系统中的成像透镜 1 到成像透镜 2 的间距要求偏差不得超过 $\pm 3 \mu\text{m}$ 。

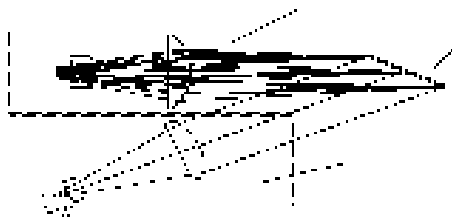


图4 单通道光学系统图
Fig.4 Single-channel optical system

5 试验与讨论

采用理论计算的高分辨率太阳直射大气吸收光谱作为算法的模拟输入,将模拟参考谱与单通道的演示样机(见图5)获取的实际观测谱进行匹配计算。在试验室首先对单通道的演示样机进行焦面和光谱定标,焦面的准确调整是采用线宽极窄(1 MHz)的可调激光器输出单色光经光纤耦合后照明样机狭缝,通过调整探测器方位对演示验证样机焦面进行了精确装调,示意图如图5所示。

光谱定标的中心波长的标定,采用焦距 1.33 m MCpherson 单色仪对样机的线形函数进行标定,单色仪的扫描分辨率为 0.04 nm,波长精度



图5 演示样机的焦面精确调整示意图
Fig.5 Sketch map of focus plane precise adjusting of demo device

优于 0.05 nm,线形函数标定后得到的样机色散规律,作为仪器光谱标定计算的初始解。线性函数标定的流程图如图6所示。

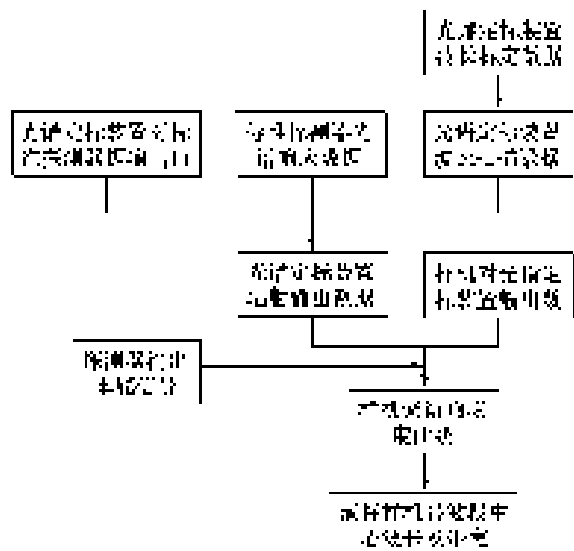


图6 谱线中心波长线性函数标定的流程图
Fig.6 Flow diagram of spectrum center wavelength linear function calibration

焦面校准和光谱定标试验完成后,采用演示样机直接观测室外大气谱验证实验结果。为获得大气光谱参考标准,利用 LBLRTM 大气模拟软件和 HITRAN 分子吸收库计算室外观测的模拟参考光谱,计算分辨率为 0.004 nm,直接观测的原始图像(13 $\mu\text{m} \times 13 \mu\text{m}$,幅面尺寸 616 pixel \times 1 280 pixel)。如图7所示。理论计算的高分辨率大气吸收光谱如图8所示。

模拟参考光谱与实测样机线形函数卷积后经归一化与样机实际观测光谱的比较如图9所示,

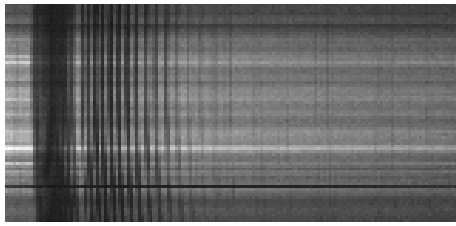


图7 演示验证样机采集原始图像

Fig.7 Demonstration of original image collection

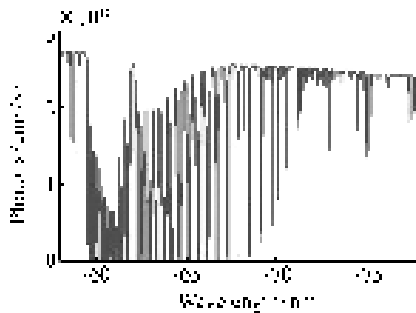


图8 理论计算的高分辨率大气吸收光谱

Fig.8 High resolution atmosphere absorption spectroscopy obtained by theory calculation

结果表明,光谱特征与相对吸收深度非常吻合,验证了样机获取高分辨率大气吸收光谱的能力,但是谱线位置存在相应偏差。

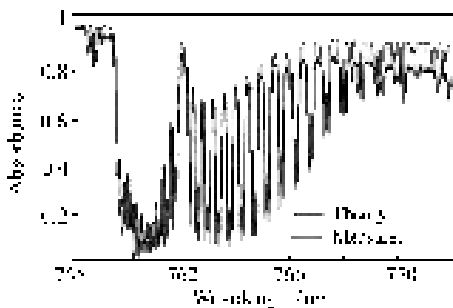


图9 理论模拟光谱与实测大气谱比较曲线图

Fig.9 Comparison curves between theory simulation spectrum and actual atmospheric spectrum

进一步采用自行开发的光谱配准算法对谱线位置进行了匹配计算,匹配算法采用实验室内定标后预校准的测量谱线与大气理论参考谱线均方根最小为优化目标,采用大规模搜索算法寻优稳定谱线匹配的最佳收敛解,进而校准仪器中心波长矩阵表,其中谱线搜索匹配算法采用的是高斯-

牛顿算法。谱线匹配光谱标定方法框图如图10所示。

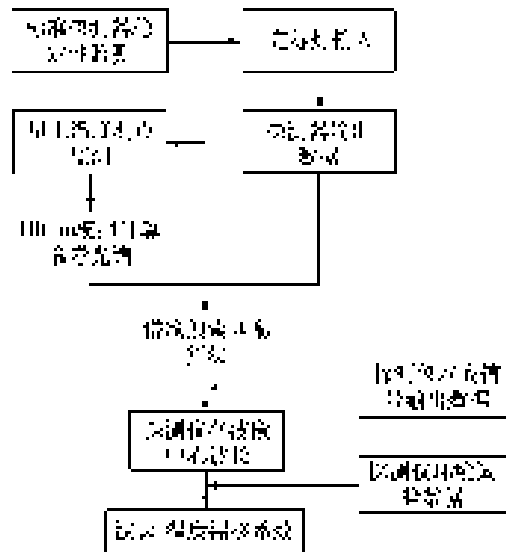


图10 谱线匹配光谱标定方法框图

Fig.10 Block diagram of spectrum calibration method with spectral line matching

谱线匹配结果如图11所示,结果表明在吸收线深度稳定位置的配准峰值点偏差小于0.006 nm,取763~766 nm进行放大,利于分析谱线配准效果,也初步验证配准算法的有效性,从而验证单通道光学系统的合理性和可行性,为下一步工程设计提供正确的光学参考条件。

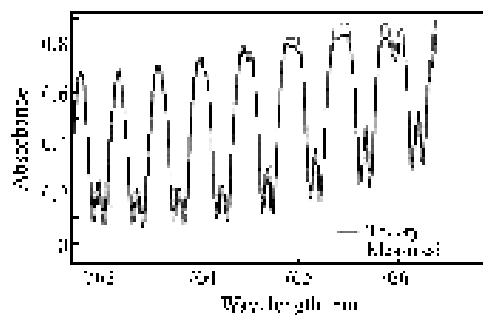


图11 与理论谱的波长匹配效果

Fig.11 Matching effect of the measured spectrum and the theory simulation spectrum

6 结论

通过利用单通道原理样机,在焦面精确调整

和光谱中心波长定标后,由LBLRTM大气模拟软件和HITRAN分子吸收库来计算室外观测的模拟参考光谱,并进行外部的实际大气光谱的测试,采用光谱配准算法对两种谱线位置进行匹配计算,得出在吸收线深度稳定位置的配准峰值点偏差小

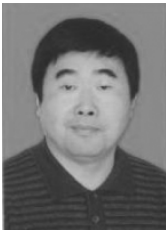
于0.006 nm,验证匹配算法的有效性和单通道光学设计的合理性和可行性。这种采用单通道演示样机方法能够准确、高效地验证光学设计的正确性,为后续工程项目的开展打下了坚实的技术基础。

参考文献:

- [1] 郑玉权. 温室气体遥感探测仪器发展现状[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)
- [2] POLLOCK R, HARING R E, HOLDEN J R. The orbiting carbon observatory instrument: performance of the OCO instrument and plans for the OCO-2 instrument. sensors, systems and next-generation satellites XIV[J]. *SPIE*, 2010, 7826: 7.
- [3] BROBERG S E, PAGANO T S, AUMANN H H. Atmospheric sounding at JPL: current and future technologies[J]. *SPIE*, 2003, 5074: 600-611.
- [4] MILLER C R. Status of the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)[J]. *SPIE*, 1996, 2961: 73-90.
- [5] MORSE P, BATES J AND MILLER C. Development and Test of the Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)[J]. *SPIE*, 1999, 3759: 236-253.
- [6] HENRI G C, CARINA O, ANNE E Z, *et al.* SCIAMACHY the completion of a new-generation instrument for studying the atmosphere[J]. *SPIE*, 2011, 2957: 20-30.
- [7] 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): 567-574.
ZHAO M J, SI F Q, JIANG Y, *et al.*. In-lab calibration of space-borne differential optical absorption spectrometer In-lab calibration[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(3): 567-574. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 周海金, 刘文清, 司福祺, 等. 星载大气痕量气体差分吸收光谱仪杂散光抑制[J]. 光学精密工程, 2012, 20(11): 2331-2337.
ZHOU H J, LIU W Q, SI F Q, *et al.*. Stray light suppression of space-borne differential optical absorption spectrometer for monitoring atmospheric trace gas[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2331-2337. (in Chinese)
- [10] 姚波, 袁立银, 亓洪兴, 等. 双通道成像光谱仪共用离轴三反射光学系统的设计[J]. 红外技术, 2013, 35(7): 419-424.
YAO B, YUAN L Y, QI H X, *et al.*. Optical design of a dual-channel imaging spectrometer sharing the off-axis TMA system[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(7): 419-424. (in Chinese)
- [11] 李胜, 张玉钧, 高闯光, 等. 一种傅立叶变换红外光谱仪动镜扫描系统的设计[J]. 红外技术, 2013, 34(1): 48-52.
LI SH, ZHANG Y J, GAO M G, *et al.*. Design of the moving mirror scanning system for a FT-IR spectrometer[J]. *Infrared Technology*, 2013, 34(1): 48-52. (in Chinese)
- [12] NOEL S, BOVENSMANN H, BURROWS J P, *et al.*. The SCIAMACHY instrument on ENVISAT-1[J]. *SPIE*, 1998, 3498: 94-104.
- [13] 王龙, 蔺超, 郑玉权. CO₂探测仪星上定标铝漫反射板的制备与试验[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 591-599.
WANG L, LIN CH, ZHENG Y Q. Fabrication and experiment of aluminum diffuser for CO₂ detector calibration on orbit[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(4): 591-599. (in Chinese)
- [14] 金辉, 姜会林, 郑玉权, 等. 高光谱遥感器的光谱定标[J]. 发光学报, 2013, 34(2): 235-239.
JIN H, JIANG H L, ZHENG Y Q, *et al.*. Spectral calibration of the hyperspectral optical remote sensor[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2013, 34(2): 235-239. (in Chinese)

- [15] AUMANN H H, CHAHINE M T, CAUTIER C, *et al.*. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: design, science objectives, data products, and processing systems[J]. *IEEE*, 2003, 41(2):253-264.
- [16] ZOUTMAN E, OLIJ C. Calibration approach for sciamachy[J]. *SPIE*, 1997, 3117:306-316.
- [17] WERIJ H, OLIJ C, ZOUTMAN A E, *et al.*. SCIAMACHY the completion of a new-generation instrument for studying the atmosphere[J]. *SPIE*, 1997, 2957:20-30.
- [18] 刘倩倩, 郑玉权. 超高分辨率光谱定标技术发展概况[J]. *中国光学*, 2012, 5(6):566-577.
LIU Q Q, ZHENG Y Q. Development of spectral calibration technologies with ultra-high resolutions[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6):566-577. (in Chinese)
- [19] 李欢, 周峰. 星载超光谱成像技术发展展望[J]. *光学与光电技术*, 2012, 10(5):38-44.
LI H, ZHOU F. Development of spaceborne hyperspectral imaging technique[J]. *Optics Optoelectronic Technology*, 2012, 10(5):38-44. (in Chinese)

作者简介:



高明辉(1971—),男,吉林榆树人,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事光机结构设计、分析,检测设备设计等方面的研究。E-mail:ccgaomh@163.com



郑玉权(1972—),男,内蒙古通辽人,博士,研究员,主要从事航空航天高光谱成像技术、光学系统设计、光谱辐射定标等方面的研究。E-mail:zhengyq@skao.ac.cn