

静态干涉型高温温度场成像探测方法研究

张瑞 徐承雨 王志斌 唐维平 薛鹏 李孟委

Imaging and detection method for static interferometric high-temperature temperature field

ZHANG Rui, XU Cheng-yu, WANG Zhi-bin, TANG Wei-ping, XUE Peng, LI Meng-wei

引用本文:

张瑞, 徐承雨, 王志斌, 唐维平, 薛鹏, 李孟委. 静态干涉型高温温度场成像探测方法研究[J]. *中国光学*, 2023, 16(4): 796-801.

doi: 10.37188/CO.2022-0168

ZHANG Rui, XU Cheng-yu, WANG Zhi-bin, TANG Wei-ping, XUE Peng, LI Meng-wei. Imaging and detection method for static interferometric high-temperature temperature field[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(4): 796-801. doi: 10.37188/CO.2022-0168

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0168>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

温度场纹影定量测量技术

Quantative measuring technique for the temperature of flow fields in schlieren systems

中国光学 (中英文). 2018, 11(5): 860 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0860>

空气导热作用下Nd:YAG晶体温场特性

Temperature field of Nd: YAG crystal under air heat transfer

中国光学 (中英文). 2019, 12(3): 686 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0686>

高温下数字图像相关散斑最优成像探究

Optimal imaging of digital image correlation speckle under high temperature

中国光学 (中英文). 2018, 11(5): 728 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0728>

移动地面站宽温度跟瞄系统信标接收镜头

Wide temperature range beacon receiver lens for tracking and aiming system of mobile ground station

中国光学 (中英文). 2018, 11(5): 790 <https://doi.org/10.3788/CO.20181105.0790>

ZnS:Cu电致发光电压传感器及其温度漂移补偿

ZnS:Cu electroluminescent voltage sensor and its temperature drift compensation

中国光学 (中英文). 2017, 10(4): 514 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0514>

基于光电探测的多光谱测温装置

Multi-spectral temperature measuring system based on photoelectric detection

中国光学 (中英文). 2019, 12(2): 289 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0289>

文章编号 2097-1842(2023)04-0796-06

静态干涉型高温温度场成像探测方法研究

张 瑞^{1,2*}, 徐承雨^{1,2}, 王志斌^{1,2,3}, 唐维平^{1,3}, 薛 鹏^{1,2}, 李孟委^{2,3}

(1. 中北大学 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051;

2. 中北大学 前沿交叉科学研究院, 山西 太原 030051;

3. 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051)

摘要: 为了实现航空航天发动机尾焰、燃烧、爆炸等高温温度场的非接触高精度测量, 对静态干涉型高温温度场探测方法展开研究。首先, 设计静态干涉型高温温度场探测系统, 理论分析高温温度场测量原理, 研究高温干涉信号强度最低点光程差与温度的关系; 其次, 针对常用温度范围及可见光面阵探测器的响应波段, 设计静态干涉具 Savart 棱镜, 结合一维扫描实现温度场成像; 最后, 设计光学系统, 拟合获得干涉最弱光程差与温度的对应关系, 并获得线性拟合公式, 仿真验证温度场经过系统后到达面阵探测器的干涉信号图像。结果表明, 该静态干涉型高温温度场探测方法可实现 1 000 K–3 000 K 温度的高精度探测, 且在线性区域, 温度测量分辨率为 1.4 K, 温度测量相对误差优于 0.8%。本文研究为军民领域的高精度高温温度场成像提供参考。

关键词: 高温温度场; 干涉信号; 静态干涉具; 温度分辨率

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2022-0168

Imaging and detection method for static interferometric high-temperature temperature field

ZHANG Rui^{1,2*}, XU Cheng-yu^{1,2}, WANG Zhi-bin^{1,2,3}, TANG Wei-ping^{1,3}, XUE Peng^{1,2}, LI Meng-wei^{2,3}

(1. *Engineering and Technology Research Center of Shanxi Provincial for Optical-Electric Information and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051, China;*

2. *Academy for Advanced Interdisciplinary Research, North University of China, Taiyuan 030051, China;*

3. *School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)*

* *Corresponding author, E-mail: zhangrui@nuc.edu.cn*

Abstract: In order to realize the non-contact high-precision measurement of high-temperature temperature fields such as the tail flame, combustion and explosion of aerospace engines, a static interferometric high-temperature temperature field imaging and detection method is studied. Firstly, a static interference high-temperature temperature field detection system is designed. On the basis of theoretical analysis of the measurement principle of high-temperature temperature fields, the relationship between the optical path difference and the temperature at the lowest point of high-temperature interference signal intensity is studied. Secondly, according to the response band of the visible light area array detector and the common temperature range, a static interferometric Savart prism is designed, and temperature field imaging is realized by using it for one-dimensional scanning. Finally, the optical system is designed and the corresponding relationship between the

收稿日期: 2022-07-22; 修订日期: 2022-08-24

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 62105302)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62105302)

minimum optical path difference of the interference and the temperature is obtained by fitting. From this, the linear fitting formula is obtained. Simulations are conducted to verify the interference signal image where the temperature field after passing through the system reaches the area detector. The static interferometric high-temperature temperature field detection method can achieve the high-precision detection of 1 000 K–3 000 K temperatures. In the linear region, the temperature measurement resolution is 1.4 K and the temperature measurement relative error is better than 0.8%. This research lays the foundation for high-precision high-temperature temperature field imaging in the military and civilian fields.

Key words: high-temperature temperature field; interference signal; static interferometer; temperature resolution

1 引言

发动机是各类导弹、航空航天飞行器的主要动力来源,其工作性能直接决定飞行器的速度、射程、打击效能等。发动机燃烧火焰具有高温、非稳定、强辐射等特点,导致其温度场分布不均匀且变化剧烈。这种复杂恶劣工况对发动机燃烧火焰温度的准确测量提出更高要求,因此燃烧爆炸温度场的精细化测试对新一代航空航天技术具有重要意义,尤其是对于温度场的测量,燃烧爆炸温度是反映推进剂能力大小的重要因素,可指导发动机结构设计^[1-5]。

高温温度测量方法主要有接触式和非接触式两种^[6]。在接触式测温中,热电偶最为常用,但接触式测量会干扰燃烧流场,并且其测量范围有限^[7-9]。非接触测温主要分为主动和被动两类,前者典型的有激光光谱燃烧火焰测温技术,但无法满足复杂工况,被动测温主要有原子发射光谱技术和辐射成像光谱技术,但都需要通过干涉信号傅立叶反演或光栅分光方式测出光谱,再根据光谱测得温度,并且其测量温度精度与光谱分辨率有很大关系^[10-12]。本文提出的非接触式静态干涉高温温度测量方法,无需测得光谱,直接采用高温温度辐射的干涉信号反演温度^[13-16]。

2 基于 Savart 棱镜的静态干涉型高温温度场探测基本原理

2.1 基于 Savart 棱镜的高温温度场成像基本原理

Savart 棱镜静态干涉型高温温度场探测成像原理如图 1(彩图见期刊电子版)所示,被测高温目标光沿 z 轴通过前置第一次成像镜头 L,将目

标像成像在带狭缝的反射镜 M 上;狭缝处的目标像依次通过 0° 偏振片 P_1 、Savart 棱镜、 90° 偏振片 P_2 和后置成像镜头 L_1 ,将狭缝处对应目标的干涉图像二次成像在面阵 CCD₁ 上,由柱面镜 C 将干涉信号汇聚在 CCD₁ 上。可以看出 CCD₁ 图像的 x 方向就是被测高温目标空间 x 维信息,CCD₁ 图像另外的方向为不同光程差 ΔL 干涉信号的强度。温度不同则对应的干涉信号最低处的位置不同,根据该原理进行高温温度测量,通过对目标 y 方向的扫描实现二维温度场成像,其中 Savart 棱镜 S 倾斜,使其干涉信号的零光程差位于 CCD₁ 的边缘,从而能使得干涉信号最低点充分利用 CCD₁ 像素。被 M 反射的光经过第二个后置成像镜头 L_2 成像在面阵 CCD₂ 上。可以看出 CCD₂ 成像对应目标与 CCD₁ 成像对应目标刚好互补,且共轴,这样便于根据 CCD₂ 成像图像确定 CCD₁ 测温对应目标的位置。

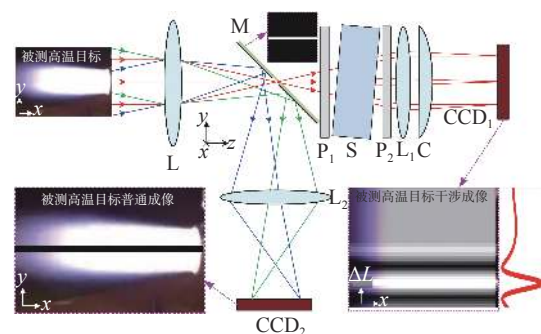


图 1 基于 Savart 棱镜的静态干涉型高温温度场探测原理图

Fig. 1 Schematic diagram of static interference high-temperature temperature field detection based on a Savart prism

2.2 Savart 棱镜静态干涉信号测温原理

Savart 棱镜干涉信号测温光路如图 2 所示,

将狭缝 M 处的第一次像依次通过偏振片 P_1 、Savart 棱镜、偏振片 P_2 ，由二次成像镜头 L_1 成像在面阵探测器 CCD_1 上。同时在 L_1 后加入柱面镜使目标从不同方向入射到 Savart 棱镜的光汇聚干涉，也就是使 CCD_1 正好处在镜头 L_1 的像面上 (像距为 f_1)，同时 CCD_1 也在镜头 L_1 和 C 组合镜头的焦面上 (等效焦距为 f_2)。由于本文测温方法无需反演光谱，只需要知道干涉信号的最低点位置即可，因此，为了更好地利用 CCD_1 像素，将 Savart 棱镜旋转 α 角度，使其干涉信号的零光程差位于 CCD_1 的边缘，如图 2 右图所示。而干涉信号零光程差位置与被测目标温度无关，仅作参考，而随着被测目标温度的不同，干涉信号光强最低 I_{\min} 时对应的光程差及 CCD_1 的像素位置不同。详细分析如下。

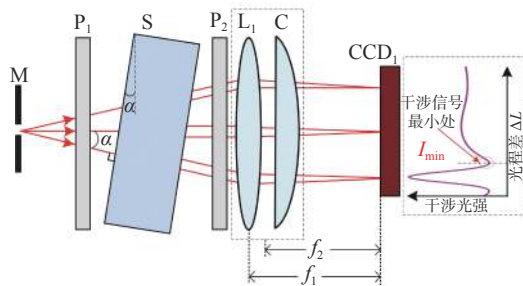


图 2 Savart 棱镜静态干涉温度场探测光路图

Fig. 2 The optical path diagram of Savart prism static interference temperature field detection

由于航空航天发动机尾焰几乎可以理解为是黑体或者灰体辐射，根据辐射定理和干涉原理，高温黑体 (或灰体) 的干涉信号 $I(\Delta L)$ 随光程差 ΔL 的变化公式为：

$$I(\Delta L) = \int_0^{\infty} I(T, \lambda) \times \eta_{\text{CCD}}(\lambda) \times \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi\Delta L}{\lambda}\right) \right] d\lambda, \quad (1)$$

其中， $I(T, \lambda)$ 为高温黑体 (或灰体) 在 T 温度下的光谱， $\eta_{\text{CCD}}(\lambda)$ 为 CCD_1 的光谱响应度。

结合常用硅 CCD 光谱响应及不同温度高温黑体 (或灰体) 辐射定理，归一化后的干涉信号如图 3 (彩图见期刊电子版) 所示。由图 3 可以看出，温度不同，干涉信号强度最低处的光程差也不同。根据光学系统和 CCD_1 的像元尺寸，就可获得干涉信号强度最低 I_{\min} 处对应的像素位置与被测目标温度 T 的关系，这就是干涉测温的基本原理。

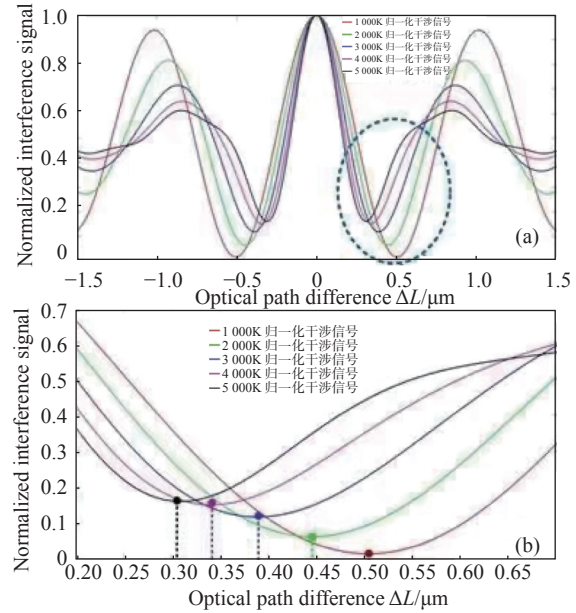


图 3 (a) 不同温度高温黑体 (或灰体) 归一化干涉信号图; (b) 图 (a) 中圆圈区域局部放大图

Fig. 3 (a) Normalized interference signal diagram of the high temperature black body (or gray body) at different temperatures; (b) enlarged drawing of the area marked in (a)

3 温度场成像系统设计与分析

3.1 光学参数设计与分析

设计系统面阵探测器采用索尼 IMX547-AAMJ 面阵探测器，分辨率可达 2472×2064 ，像元尺寸为 $2.74 \mu\text{m}$ ；根据图 3 可知，1000~5000 K 高温目标干涉信号最低点对应光程差 ΔL_{\min} 为 300~500 nm。为了便于根据前后光程差找最低干涉光强 (如图 3)，设计面阵探测器探测 200~650 nm 的光程差范围。设计 Savart 棱镜干涉系统的最大光程差为 650 nm，已知 Savart 棱镜分光产生的光程差 ΔL 的计算公式为：

$$\Delta L = \frac{\sqrt{2}xt}{f_2} \left(\frac{n_o^2 - n_e^2}{n_o^2 + n_e^2} \right), \quad (2)$$

其中， n_o 、 n_e 分别为 Savart 棱镜对 o 光、e 光的折射率， t 是 Savart 棱镜的单板厚度， ΔL 是探测点的光程差， x 是探测点到干涉对称中心的距离， f_2 是镜头 L_1 和 C 组合镜头的等效焦距。根据光谱范围，Savart 棱镜选用石英， $n_o=1.55335$ 、 $n_e=1.54424$ ， $f_2=300 \text{ mm}$ ，最大光程差 $\Delta L_{\max}=650 \text{ nm}$ ，根据面阵探测器尺寸及光程差要求可得 $x_{\max}=21.087 \text{ mm}$ 。

将上述参数带入式(2)可得 Savart 棱镜的平板厚度 $t=1.1\text{ mm}$ 。

3.2 干涉测温拟合及指标分析

根据 2.2 节和 3.1 节分析可知, 航空航天发动机等被测高温目标温度与干涉信号最低点的光程差一一对应, 如图 3 所示, 根据被测高温目标温度范围 1000~5000 K, 结合硅 CCD 光谱响应和干涉信号公式(1)可得, 不同干涉信号最低光程差 ΔL_{\min} 与被测目标温度的关系如图 4 所示。

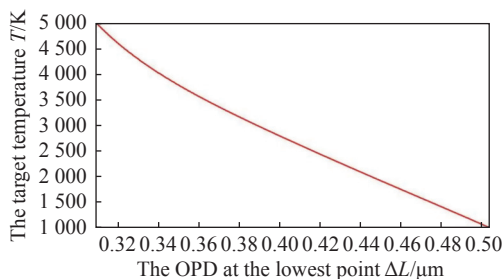


图 4 干涉信号最低光程差 ΔL_{\min} 与被测目标温度关系图
Fig. 4 The relationship between the lowest optical path difference ΔL_{\min} of the interference signal and the temperature of the measured target

由于常用高温目标温度主要是 1000~3000 K, 由图 5 可以看出, 该温度范围内线性度较好。对干涉信号最低光程差 ΔL_{\min} 与被测目标温度进行最小二乘线性拟合, 如公式(3)所示。

$$T = -17.3915 \times \Delta L_{\min} + 9.7214 \times 10^3 \quad (3)$$

其相对误差 $\leq 0.51\%$, 其灵敏度为 17.4 K/nm。结合上述 3.1 部分分析可得该系统在线性区域的指标参数, 如表 1 所示。其中, 温度分辨率主要与面阵探测器像元尺寸对应的光程差分辨率有关。像元尺寸对应的光程差分辨率越高, 温度分辨率越高, 但测量的温度范围越窄。

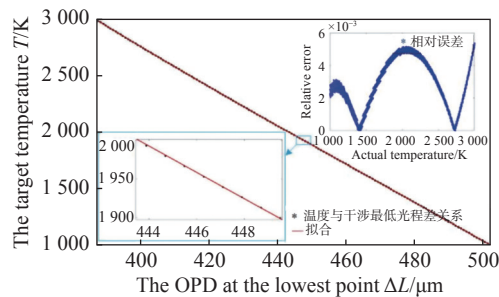


图 5 最低光程差 ΔL_{\min} 与被测目标温度的关系及拟合误差
Fig. 5 The relationship between lowest optical path difference ΔL_{\min} and the measured target temperature and the fitting error

表 1 指标参数

Tab. 1 Index parameters

指标名称	参数值
测温范围	1000~3000 K
光程差范围	200~650 nm
面阵探测器分辨率	2472×2064
像元尺寸	2.74 μm ×2.74 μm
等效焦距 f_2	45 mm
温度分辨率	1.4 K

3.3 系统仿真验证

为进一步验证上述分析, 仿真整个高温温度场测量过程, 设图 1 带狭缝反射镜 M 的狭缝处对应的高温温度场如图 6(a) (彩图见期刊电子版) 所示。可见, 被测高温目标温度场在 1000~3000 K 之间。经过光学系统到达面阵探测器上的干涉信号图像如图 6(b) 所示。由图 6(b) 可知: 温度不同, 干涉信号不同, 尤其是干涉信号最弱光强对应的位置。

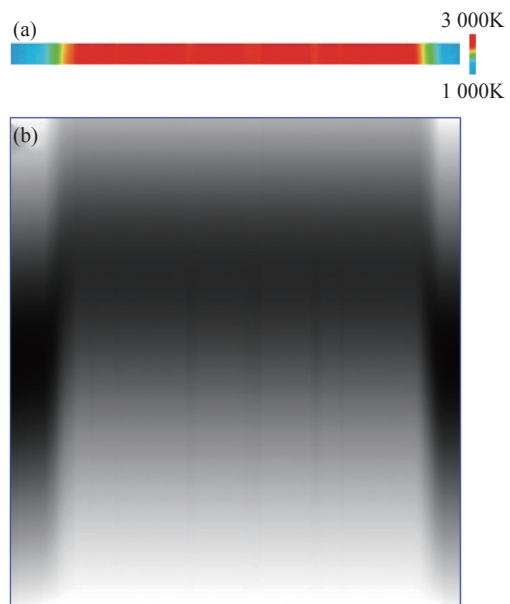


图 6 高温温度场及面阵探测器获得的干涉图像
Fig. 6 The high-temperature temperature field and the interference image obtained by the area array detector

将获得的被测温度场干涉图像带入式(3)中, 反演获得不同位置的温度, 如图 7 (彩图见期刊电子版) 红色曲线所示, 其相对误差如图 8 所示。采用上述类似的方法对温度场为 1500~2500 K、2000~3000 K 的不同温度分布目标进行仿真测试。结

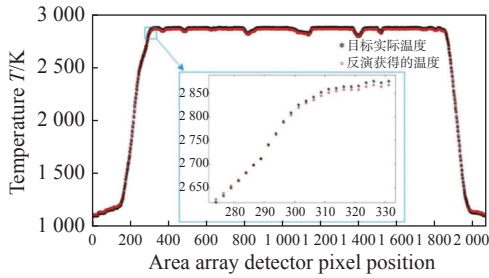


图 7 测量获得的温度与原来入射温度对比图

Fig. 7 Comparison of the measured temperature and original incident temperature

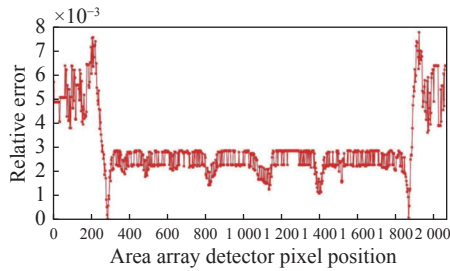


图 8 测量温度相对误差

Fig. 8 Relative error of the measured temperature

果显示: 温度场整体的相对误差都优于 0.8%。该误差主要由探测器强度灵敏度、光强分辨率及面阵探测器分辨率决定。

4 结 论

本文根据现有航空航天发动机尾焰、燃烧、爆炸等高温温度场的测量需要, 以及现有高温温度场存在的问题, 提出静态干涉型高温温度场探测方法, 并解释系统的工作原理。研究了高温干涉信号强度最低点光程差与温度的关系, 设计了静态干涉具 Savart 棱镜和光学系统, 并拟合获得干涉最弱光程差与温度的对应线性拟合公式, 进行系统仿真验证。仿真结果表明: 该静态干涉型高温温度场探测方法可实现 1 000~3 000 K 温度的高精度线性探测, 温度测量分辨率为 1.4 K, 温度测量相对误差优于 0.8%。为军民领域的高精度高温温度场成像奠定基础。

参考文献:

- [1] 刘晶儒, 胡志云. 基于激光的测量技术在燃烧流场诊断中的应用[J]. *中国光学*, 2018, 11(4): 531-549.
LIU J R, HU ZH Y. Applications of measurement techniques based on lasers in combustion flow field diagnostics[J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(4): 531-549. (in Chinese)
- [2] HAN J C. Fundamental gas turbine heat transfer[J]. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2013, 5(2): 021007.
- [3] MODEST M F, HAWORTH D C. *Radiative Heat Transfer in Turbulent Combustion Systems: Theory and Applications*[M]. New York: Springer, 2016.
- [4] POLIFKE W. Modeling and analysis of premixed flame dynamics by means of distributed time delays[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2020, 79: 100845.
- [5] 李昂, 王秋林, 张晓林, 等. 民用飞机研制的高温测量应用分析[J]. *成都航空职业技术学院学报*, 2021, 37(1): 35-38.
LI A, WANG Q L, ZHANG X L, et al.. Application analysis of pyrometry in civil aircraft manufacturing[J]. *Journal of Chengdu Aeronautic Polytechnic*, 2021, 37(1): 35-38. (in Chinese)
- [6] 贺宗琴. 表面温度测量[M]. 北京: 中国计量出版社, 2009.
HE Z Q. *Surface Temperature Measurement*[M]. Beijing: China Metrology Press, 2009. (in Chinese)
- [7] MEKHRENGIN M V, MESHKOVSKII I K, TASHKINOV V A, et al.. Multispectral pyrometer for high temperature measurements inside combustion chamber of gas turbine engines[J]. *Measurement*, 2019, 139: 355-360.
- [8] 李伟. 热电偶测温误差的来源与处理[C]. 第十八届中国航空测控技术年会论文集, 《测控技术》杂志社, 2021: 256-259.
LI W. Sources and treatment of thermocouple temperature measurement error[C]. *Proceedings of the 18th China Annual Conference on Aerial Measurement and Control Technology*, Measurement and Control Technology Magazine, 2021: 256-259.
- [9] VON MOLL A, BEHBAHANI A R, FRALICK G C, et al.. A review of exhaust gas temperature sensing techniques for modern turbine engine controls[C]. *Proceedings of the 50th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, AIAA, 2014: 3977.
- [10] NI M J, ZHANG H D, WANG F, et al.. Study on the detection of three-dimensional soot temperature and volume

- fraction fields of a laminar flame by multispectral imaging system[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 96: 421-431.
- [11] 郑翔远, 叶新, 罗志涛, 等. 高精度辐射热流计的不确定度分析与评价[J]. *中国光学(中英文)*, 2022, 15(4): 780-788. ZHENG X Y, YE X, LUO ZH T, *et al.*. Uncertainty analysis and evaluation of a high-precision radiative heat-flux meter[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(4): 780-788. (in Chinese)
- [12] 蔡红星, 胡馨月, 李昌立, 等. 强激光毁伤过程的热辐射谱测量[J]. *中国光学*, 2012, 5(3): 277-282. CAI H X, HU X Y, LI CH L, *et al.*. Thermal radiation spectral measurement of intense laser damage[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 277-282. (in Chinese)
- [13] MODEST M F, MAZUMDER S. *Radiative Heat Transfer*[M]. 4th ed. Amsterdam: Academic Press, 2021.
- [14] 吕金光, 梁静秋, 赵百轩, 等. 全景双波段红外成像干涉光谱测量反演仪器[J]. *中国光学(中英文)*, 2022, 15(5): 1092-1104. LV J G, LIANG J Q, ZHAO B X, *et al.*. Panoramic bispectral infrared imaging interference spectrum measurement inversion instrument[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(5): 1092-1104. (in Chinese)
- [15] 刘东, 姚清睿, 张思诺, 等. 拉曼激光雷达大气温湿压探测技术研究进展[J]. *中国光学(中英文)*, doi: 10.37188/CO.2022-0145. LIU D, YAO Q R, ZHANG S N, *et al.*. Research progress of raman lidar temperature and humidity pressure detection technology[J]. *Chinese Optics*, doi: 10.37188/CO.2022-0145. (in Chinese)
- [16] 莫苏新. 基于 CCD 的高温温度场测量方法研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2020. MO S X. *Research on high temperature field measurement method based on CCD*[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)

作者简介:



张 瑞(1987—), 男, 山西长治人, 博士, 教授, 2011年、2017年于中北大学分别获得物理学学位, 信息与通信工程博士学位, 主要研究方向包括光电探测、光谱(偏振)成像、光谱椭圆偏测量、压缩感知光电信息获取、光电目标识别、激光告警, 先后主持国家自然科学基金项目、总装工程项目、总装测试仪器项目、总装预研项目、军委创新项目、山西省青年基金等8项。申请专利40多项, 已授权15多项, 发表高水平学术论文22篇, 其中SCI收录10篇, EI收录6篇。E-mail: zhangrui@nuc.edu.cn