

文章编号: 1002-1582(2025)06-0710-06

# 基于改进双光阑法的光谱发射率装置的线性测量研究

李天硕<sup>1,2</sup>, 陈新华<sup>1\*</sup>, 冯国进<sup>2\*\*</sup>, 郑春弟<sup>2</sup>, 刘旭峰<sup>2</sup>, 张振元<sup>2</sup>

(1. 北京建筑大学 机电学院城市轨道交通车辆服役性能保障北京市重点实验室, 北京 100044)

(2. 中国计量科学研究院 光学与激光计量科学研究所, 北京 100029)

**摘 要:** 针对真空低温状态下, 材料光谱发射率测量装置的线性问题, 提出了一种采用中红外中性光谱滤光片结合双光阑的方法评估了系统线性, 给出了非等比点处发射率的线性度。实测了典型材料在 $60^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、 $80^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 下, 不同波长下的发射率测量系统的线性度。在 $60^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 下, 不同波长下的系统线性度在0.936~1.013, 在 $80^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 下, 不同波长下的系统线性度在0.992~1.114。结果表明, 波长为 $8\mu\text{m}$ 、 $12\mu\text{m}$ 、 $16\mu\text{m}$ 时, 发射率越低, 对应的系统线性越差。依据该结果对材料真空低温发射率测量装置测量出的发射率进行线性修正, 提高了测量结果的准确度。

**关 键 词:** 真空低温; 发射率; 系统线性; 傅里叶光谱仪

中图分类号: O433.1

文献标识码: A

## Linear measurement of spectral emissivity device based on improved double diaphragm method

LI Tianshuo<sup>1,2</sup>, CHEN Xinhua<sup>1\*</sup>, FENG Guojin<sup>2\*\*</sup>, ZHENG Chundi<sup>2</sup>, LIU Xufeng<sup>2</sup>, ZHANG Zhenyuan<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical-Electronic and Vehicle Engineering, Beijing University of Civil

Engineering and Architecture, Beijing 10044, China)

(2. Institute of Optics and Laser Metrology Science, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Aiming at the linearity problem of the material spectral emissivity measurement device under vacuum and low-temperature conditions, a method using a mid-infrared neutral spectral filter combined with a double diaphragm was proposed to evaluate the system linearity, and the linearity of the emissivity at the non-proportional points was given. The linearity of the emissivity measurement system for typical materials at different wavelengths at  $60^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$  and  $80^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$  was measured. At  $60^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ , the system linearity at different wavelengths is 0.936 to 1.013, and at  $80^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ , the system linearity at different wavelengths is 0.992 to 1.114. The results show that when the wavelengths are  $8\mu\text{m}$ ,  $12\mu\text{m}$ , and  $16\mu\text{m}$ , the lower the emissivity, the worse the linearity of the corresponding system. Based on this result, the emissivity measured by the material vacuum low-temperature emissivity measurement device was linearly corrected, which improved the accuracy of the measurement results.

**Keywords:** vacuum cryogenic; emissivity; systematic linearity; infrared fourier spectrometer

## 0 引 言

材料的发射率是表征其辐射能力的重要物理

量, 它反映了材料表面在特定温度下辐射能量的效率。发射率能直接影响物体热辐射能量的释放与吸收, 进而影响到能源效率、温度控制、环境

收稿日期: 2025-06-06; 收到修改稿日期: 2025-07-13

基金项目: 国家重点研发专项 (2021YFF0600204)

作者简介: 李天硕 (2000—), 男, 硕士研究生, 从事道路交通光谱逆反射研究。lts781929197@163.com

陈新华 (1983—), 男, 副教授, 从事机电工程研究。

冯国进 (1981—), 男, 研究员, 从事材料光谱光度计量研究。

\* 通讯作者: chenxinhua@bucea.edu.cn; fengguojin@nim.ac.cn

监测等多个方面。随着科技的发展,发射率在航空航天、材料科学、环境科学、军事、医学和能源等领域中发挥着越来越重要的作用<sup>[1-4]</sup>。

为了能够获得准确的发射率测量结果,测量系统的线性指标是其中重要的一环。系统线性的研究就具有重要的意义和应用价值<sup>[5-9]</sup>。

在中低温区域测量发射率系统的线性特性也具有重要意义,主要体现在提高材料热物性研究的准确性,确保红外测温技术的精度,优化工业质量控制(如涂层、隔热材料),增强遥感与环境监测的数据可靠性,并支持新兴技术(如柔性电子、超导材料)的开发。此外,该测量有助于标准化和仪器标定,为多光谱技术提供可靠依据。

在该领域,王宗伟等基于傅里叶光谱仪建立了一套超高温光谱发射率测量系统,通过采用多黑体温度拟合方法标定,得到高温区系统的光谱响应函数与背景辐射函数。评定了系统在高温区的光谱线性,除个别大气吸收光谱区域,系统响应的线性度始终维持在0.99以上的优异水平<sup>[10]</sup>。陈洪雷等,测试了中波红外焦平面器件的线性度,并针对实验室测量线性度带来的误差进行分析,为红外焦平面器件线性度的测量提供理论和实验依据。实验证明黑体发射率误差是线性度测量中的重要因素,测得一款中波红外焦平面产品的线性度为0.98<sup>[11]</sup>。张俊祺等,针对中国计量科学研究院建立的材料光谱发射率测量装置<sup>[12]</sup>。宋旭尧等,基于光通量倍增原理,建立傅里叶红外光谱探测系统的非线性度测量实验系统。实验发现在200~1000℃范围内,实验测量了傅里叶红外光谱探测系统的非线性度特征,给出了在典型波长3.9μm和10.6μm处的非线性度测量结果<sup>[13]</sup>。

综上所述,在目前的线性研究中,发射率测量系统的线性测量主要针对温度100℃以上的中温或者高温,中低温的测量报道难觅踪迹。这主要是由于温度低于100℃,系统测量信号较弱,同时环境带来的辐射分量较高,导致难以准确评估线性。低温、中温、高温分别对应100℃以下、100~200℃、200~1000℃。为此,中国计量科学研究院在昌平基地,搭建了一套材料真空低温发射率测量装置,提出了结合双光阑和滤光片法进行系统线性的评测研究系统线性,从而对真空低温装置发射率进行线性修正,提高测量结果的准确度。

## 1 实验原理

### 1.1 发射率测量原理

如图1所示,通过计算机控制步进电机的水平

移动,从而能将液氮黑体、黑体、样品三者的辐射信号能依次进入傅里叶变换红外光谱仪,通过光谱仪采集光谱信号,最终通过计算得到样品的发射率。

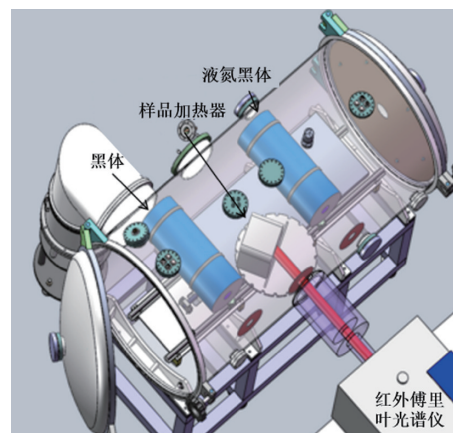


图1 测量原理图

此外,光路和其他的测量发射率的系统有显著的差异,参见图2。系统采用了平行光路设计,以提高低温下的信噪比水平。样品发出的辐射信号通过两个直径为25mm的由液氮冷却的平行光阑入射到型号为V80V的傅里叶光谱仪中。光阑安装在图3中a和c之间。

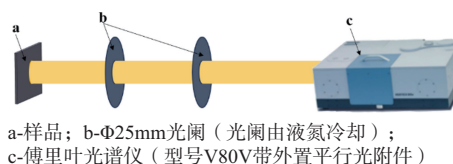


图2 光路接口

测量典型样品发射率时,需要将黑体温度和样品温度调至相同温度,分别通过傅里叶光谱仪测量样品信号、黑体信号和液氮黑体信号。发射率可以表示为

$$\epsilon_r = \frac{S_1 - S_0}{S_2 - S_0} \times \epsilon_b \quad (1)$$

式中, $\epsilon_r$ 为样品的发射率; $S_1$ 为通过傅里叶光谱仪测得的样品的信号; $S_2$ 为傅里叶光谱仪测得的黑体信号; $S_0$ 为傅里叶光谱仪测得的液氮黑体信号; $\epsilon_b$ 为黑体发射率。

### 1.2 系统线性测量原理

发射率测量系统的线性受到系统环境辐射,内部杂散光,探测器线性等因素的影响。本文采用改进双光阑法测量系统线性。其中双光阑法测量线性的原理图参见图3。测量时,将黑体移入光路,设定黑体温度到目标温度稳定后,分别通过打开或者关闭A光阑和B光阑来排列组合获得4种如图3所示状态。

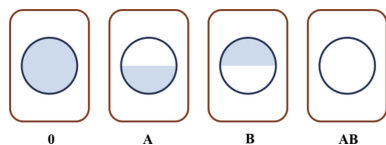


图 3 双光阑形状示意图

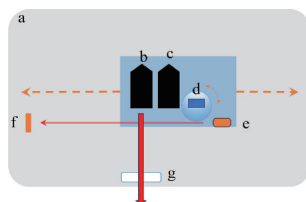
定义  $S_0$  信号为 AB 光阑均关闭时系统测量得到的信号,  $S_{1A}$  为第一次测量只有 A 光阑打开的状态,  $S_{1B}$  为第一次测量只有 B 光阑打开的状态,  $S_{1AB}$  为第一次测量 AB 光阑均打开的状态,  $S_{2A}$  为第二次测量只有 A 光阑打开的状态,  $S_{2B}$  为第二次测量只有 B 光阑打开的状态,  $S_{2AB}$  为第二次测量 AB 光阑均打开的状态。

根据双光阑非线性计算公式<sup>[13]</sup>, 推出系统的线性关系

$$LN = f_{\text{rel}}(\lambda, T, \epsilon) = \frac{S_{1AB} + S_{2AB} - 2 \times S_0}{S_{1A} + S_{2A} + S_{1B} + S_{2B} - 4 \times S_0} \quad (2)$$

式中,  $S_{1AB}$  是第一次测量 AB 光阑均打开状态下的信号;  $S_{2AB}$  是第二次测量 AB 光阑均打开状态下的信号;  $S_0$  是 AB 光阑均关闭状态下的信号;  $S_{1A}$  是第一次测量 A 光阑打开 B 光阑关闭状态下的信号;  $S_{2A}$  是第二次测量 A 光阑打开 B 光阑关闭状态下的信号;  $S_{1B}$  是第一次测量 A 光阑关闭 B 光阑打开状态下的信号;  $S_{2B}$  是第二次测量 A 光阑关闭 B 光阑打开状态下的信号。

由于罐体工作在真空低温环境, 为了避免环境光进入罐体, 影响测量, 罐体并无窗口可以直接观测内部状态, 故关闭罐门后无法观测到罐内平台移动的位置。为了保证黑体、液氮黑体和样品在光路中位移位置的准确可靠, 如图 4 所示, 罐内还安置一个可以工作在低温真空环境的激光距离传感器, 用于测量平移台的相对位移并在电脑上实时显示。样品加热台安置在一个旋转平台上, 可以通过控制样品的旋转得到不同角度的发射率。其中测量系统线性用的双光阑 g 安装在图 4 中所示光路位置。



a-罐体; b-变温黑体; c-液氮黑体; d-样品;  
e-激光测距仪; f-测距用固定靶标; g-双光阑

图 4 罐内装置位置和双光阑安装位置

### 1.3 双光阑测量线性量程的拓展

传统双光阑一般只能测量 0.5 处的线性, 以此递推。文章增加了多个线性测量点, 丰富了其它

非等比点的线性。为了实现不同发射率处的线性, 需要辅助不同的中性透射比滤光片来实现线性量程的拓展测量。中性透射比滤光片安装傅里叶变换红外光谱仪样品仓中即可。通过双光阑结合滤光片的方法测量出的系统线性是相对线性, 而对发射率修正时, 需要的系统线性是绝对线性。通过以下公式求得相对线性装换成的绝对线性

$$f(\lambda, T, \epsilon/2) = f_{\text{rel}}(\lambda, T, \epsilon/2) f(\lambda, T, \epsilon) \quad (3)$$

式中,  $f(\lambda, T, \epsilon)$  为某点的绝对线性值;  $f(\lambda, T, \epsilon/2)$  为测量  $\epsilon/2$  处的绝对线性值;  $f_{\text{rel}}(\lambda, T, \epsilon/2)$  为测量  $\epsilon/2$  处的相对线性值。

该方法得到的线性只能是 0.5, 0.25, 0.125 等依次等比递减。而在红外波段, 往往很难实现等比衰减, 对于某个特殊量值的发射率, 故上述公式可以修改为

$$f_{\text{插值}}(\lambda, T, \epsilon) = f(\lambda, T, v) + \frac{\epsilon - v}{u - v} \cdot (f(\lambda, T, u) - f(\lambda, T, v)) \quad (4)$$

式中,  $f_{\text{插值}}(\lambda, T, \epsilon)$  为计算后测量  $\epsilon$  处的绝对线性值 ( $v + u = 2\epsilon$ );  $f(\lambda, T, v)$  为测量  $v$  处的绝对线性值;  $f(\lambda, T, u)$  为测量  $u$  处的绝对线性值。

进而推得以下公式

$$f(\lambda, T, \epsilon/2) = f_{\text{rel}}(\lambda, T, \epsilon/2) f(\lambda, T, \epsilon) \approx f_{\text{rel}}(\lambda, T, \epsilon/2) f_{\text{插值}}(\lambda, T, \epsilon) \quad (5)$$

插值点必须位于已知的两个发射率线性度的范围内, 即必须内插以降低误差。根据 1.3, 采用 0.5 的滤光片结合双光阑, 可以直接计算得出 0.25 处的发射率的线性度。其他点的线性度均需要采用一定的插值或者近似获得, 例如, 在发射率为 0.25 及 0.5 之间的线性度只能通过已知的这 2 点插值得到。例如插值得到的发射率在 0.30 处的线性度, 然后在光路中插上标称透射比为 0.3 的中性光谱透射比滤光片, 再结合双光阑测量, 根据式 (3) 算得的 0.15 处的发射率的线性度。

发射率为 0.10 处的线性度则通过已知的发射率为 0.15 和发射率为 0.25 处的线性度插值得到发射率为 0.20 处的线性度, 然后再结合双光阑测量, 根据式 (3) 算得发射率为 0.10 处的发射率的线性度。发射率为 0.05 处的发射率则可以直接根据发射率为 0.10 处的发射率结合双光阑同理获得。

通过此方法可以将不同的组合按照式 (5), 插值得到真空低温发射率测量系统在发射率为 0.05 至 0.5 范围内的线性度。由于插值计算时误差会累积, 所以需确保滤光片标定精度, 滤光片的透射比准确度应该  $< 1\%$ 。

## 2 实验系统

图5所示为中国计量科学研究院新搭建的材料真空低温光谱发射率测量装置<sup>[14]</sup>,实验装置由真空罐、傅里叶光谱仪 (FTIR)、分子泵、液氮罐等组成,实验系统的实物图如图5(a)所示。真空罐三维建模示意图如图5(b)所示。真空罐为圆柱体,直径为150mm,长为150mm。其中的真空室部分里安装了一个黑体、一个液氮黑体和样品加热台,三者位于同一个由步进电机控制的平移台上。

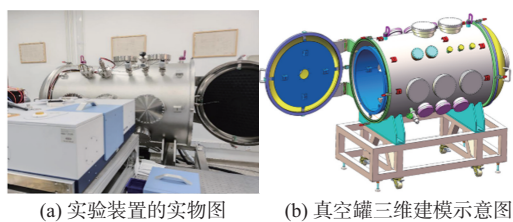


图5 系统介绍

黑体和样品加热台可以通过温度控制器独立控温。在测量过程中,将两者的温度都设置在相同温度。温度范围为 $-20\sim 100^{\circ}\text{C}$ 。

傅里叶光谱仪购自布鲁克公司,型号为V80V,它可以在真空条件下工作,波长范围覆盖 $250\text{nm}\sim 250\mu\text{m}$ 。

为了维持罐体内部的低温环境,系统共计有三个液氮罐,容量分别是30升、100升、5升。130升的液氮罐通过两根输送管和罐体连接,用于给罐体降温,提供低辐射的环境条件;100升的液氮罐通过一根输送罐与液氮黑体连接,用于液氮黑体降温实现零背景信号的扣除;5升的液氮罐用来给光谱仪的MCT探测器降温,用于实现信号的探测。

配备一个气压计,依据罐内实时气压,判断罐门紧闭程度以及开罐时机。配备抽气泵2台,一台为机械泵,一台为分子泵,接力工作抽取真空罐中的空气,从而使真空罐中达到并保持 $0.01\text{Pa}$ 的真空环境。

## 3 中性透射比滤光片的研制

不同透射比的光谱中性的滤光片是不同等级的线性产生的一个关键,也是一个难点。量值分别为10%,1%,0.1%,0.01%的4种中红外波段的透射比标准物质(编号为SRM2053~SRM2056)被美国NIST研制出来,为了实现不同透射比标准物质的制备,参照其研制工艺,基材选择易得的双抛a晶向 $\langle 100 \rangle$ 的超高阻硅片基质,并进行后

续膜系的设计<sup>[15]</sup>。

光谱中性透射比滤光片的制备关键在于膜系设计与加工工艺。由于金属材料在红外波段具有显著吸收特性,为实现光谱中性要求,本研究选用镍(Ni)、铬(Cr)、铁(Fe)三种合金靶材作为核心材料,通过精确设计膜层厚度来实现不同透射比。实验采用苏州闻道电子科技有限公司MS-Linear-100型磁控溅射镀膜设备,在 $0.1\text{Pa}$ 的工作气压下,通过直流磁控溅射工艺进行镀膜。该工艺相比传统蒸镀法能形成更致密、附着力更强的薄膜。通过系统研究镀膜时间与透射比的对应关系发现:金属膜厚度随沉积时间增加而增大,导致透射比相应降低。因此,通过精确控制沉积时间即可获得目标透射比值。实际制备成功了10%,20%,30%,和50%的滤光片,不同透过率滤光片的透射比如图6所示。其中透射比测量结果的准确度为 $0.45\%$  ( $k=2$ )。

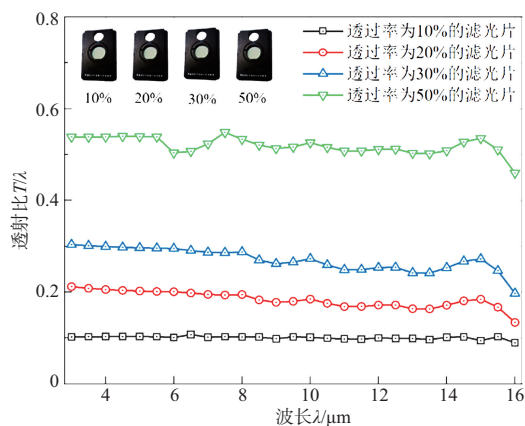


图6 不同透过率滤光片在不同波长下的透射比

## 4 材料真空低温发射率线性修正

为了评估 $100^{\circ}\text{C}$ 以下的发射率系统的线性度,选取了温度为 $60^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、 $80^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 作为典型代表。选取波长为 $6\mu\text{m}$ 、 $8\mu\text{m}$ 、 $12\mu\text{m}$ 、 $16\mu\text{m}$ ,观测实际的变化规律,结果见图7、8。由图中可以看出发射率对应的系统线性度,不同温度、波长下发射率与系统线性度之间的关系。文章测量出的线性度的偏差在百分级,其他研究线性度的偏差是在百分级到千分级,但其他研究的温度条件是在高温环境下,文章的温度条件是在中低温条件下,中低温的条件为后续的研究提供参考。

图9将图7和图8融合到同一坐标系下进行对比。通过对比可以看出,在 $60^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 和 $80^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 下,波长为 $6\mu\text{m}$ 时,系统线性与其他波长条件下的随发射率的变化有所差异。由于 $6\mu\text{m}$ 波长在 $60^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、 $80^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 下的辐射强度显著高于长波

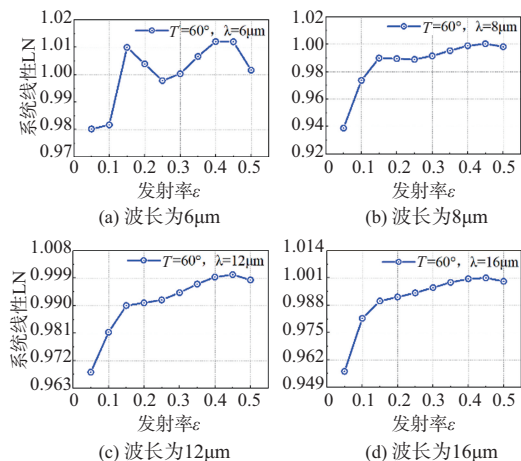


图7 60℃±1℃不同波长下发射率对应的系统线性

波段, 其高信噪比特性使得系统线性对发射率变化不敏感, 从而表现出与其他波长不同的稳定特性。在 60℃±1℃下, 波长为 8μm、12μm、16μm 时, 系统线性随着发射率的降低而降低, 和波长的关系则不显著。在 80℃±1℃下, 波长为 8μm、12μm、16μm 时, 系统线性随着发射率的降低而增加, 和波长的关系也不显著。系统线性在 1 时系统线性是最好的, 但图中可以看出两个温度下, 波长为 8μm、12μm、16μm 时, 系统线性会随着发射率的降低而变差。则可能是由于约接近发射率为 0.05 的线性, 其中包含了几乎其他所有点的测量不确定度的水平, 导致逐级累加所致。其次, 虽然整个系统在真空低温中进行, 可以有效避免环境中的无效辐射, 但是物体的辐射强度与温度的四次方成正比, 能量较弱, 导致信噪比依旧不够理想所致。

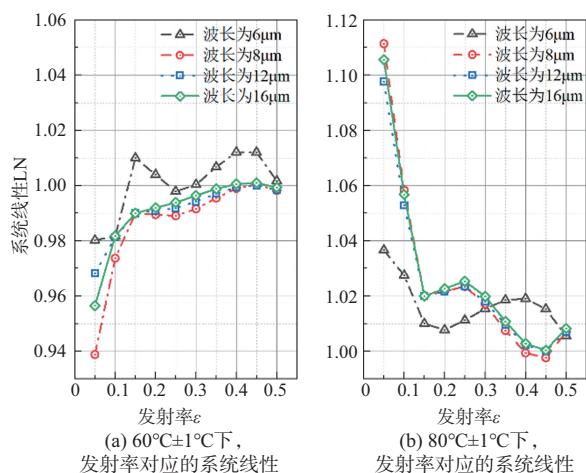


图9 不同波长下系统线性的对比图

## 5 结 论

采用中红外中性光谱滤光片结合双光阑法的方法评估了真空低温发射率测量系统在发射率为

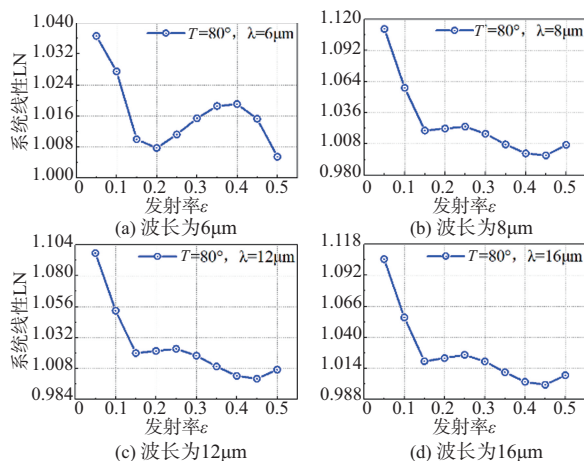


图8 80℃±1℃不同波长下发射率对应的系统线性

0.05 至 0.5 范围的线性度。在 60℃±1℃下, 6μm、8μm、12μm、16μm 波长下的系统线性度在 0.936~1.013, 在 80℃±1℃下, 6μm、8μm、12μm、16μm 波长下的系统线性度在 0.992~1.114。相比于传统的双光阑法, 增加了多个线性测量点, 丰富了其它非等比点的线性度。可以为类似系统的线性度评估或构建提供参考。

## 参考文献:

- [1] 陈益松, 王砚. 纺织面料红外发射率测量的新装置及方法[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2019, 45:386—90.  
Chen Yisong, Wang Yan. A new device and method for measuring infrared emissivity of textile fabrics[J]. Journal of Donghua University (Natural Science Edition), 2019, 45:386—90.
- [2] 刘志壹, 宋健, 郝小鹏, 等. 黑体涂层宽温区红外光谱发射率特性研究(内封面文章)[J]. 红外与激光工程, 2024, 53: 270—8.  
Liu Zhiyi, Song Jian, Hao Xiaopeng, et al. Infrared spectral emissivity Characteristics of Blackbody coatings in wide temperature region (Inner cover article) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2024, 53:270—8.
- [3] 王瑞琴, 韩颖, 高原. 红外材料光谱发射率与半球发射率测量方法研究[J]. 宇航计测技术, 2024, 44:40—3+81.  
Wang Ruiqin, Han Ying, Gao Plateau. Study on measurement methods of spectral emissivity and hemispherical emissivity of infrared materials[J]. Aerospace Measurement Technology, 2024, 44:40—3+81.
- [4] 袁良, 袁林光, 董再天, 等. 高温状态下的材料法向光谱发射率测量[J]. 应用光学, 2023, 44:580—585.  
Yuan Liang, Yuan Linguang, Dong Zaitian, et al. Measurement of material normal spectral emissivity at high temperature [J]. Applied Optics, 2023, 44:580—585.
- [5] 郭伟, 马军超. 核电厂控制棒静态棒位线性度测量方法研究与实现[J]. 自动化仪表, 2022, 43:106—10.  
Guo Wei, Ma Junchao. Research and implementation of measuring method of static rod position linearity of control rod in nuclear power plant[J]. Automation Instrumentation, 2022, 43:106—10.
- [6] 郭晓东, 宋佳玲, 龙国浩, 等. 介质基板电容分压器幅度线性

- 度研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20:1218—24.
- Guo Xiaodong, Song Jialing, LONG Guohao, et al. Research on amplitude linearity of dielectric substrate capacitor divider [J]. Terahertz Journal of Science and Electronic Information, 2022, 20:1218—24.
- [7] 蒲小琴, 董全林, 余子箫, 等. 半主动激光导引头光学系统设计及线性度分析[J]. 航天器环境工程, 2020, 37:303—9.
- Pu Xiaoqin, Dong Quanlin, Yu Zixiao, et al. Design and linearity analysis of semi-active laser seeker optical system[J]. Spacecraft Environmental Engineering, 2020, 37:303—9.
- [8] 杨阳, 唐兴刚, 李晋忠, 等. 一种MEMS陀螺仪信号调理电路线性度的测试方法[J]. 质量与可靠性, 2022, 6:19—24.
- Yang Yang, Tang Xinggang, Li Jinzhong, et al. A test method for the linearity of a MEMS gyroscope signal conditioning circuit[J]. Quality and Reliability, 2022, 6:19—24.
- [9] 张思祥, 赵业佳, 李俊成, 等. 便携式恶臭检测系统的线性度与稳定性分析[J]. 现代化工, 2017, 37:201—4.
- Zhang Sixiang, Zhao Yejia, Li Juncheng, et al. Linearity and stability analysis of portable odor detection system[J]. Modern Chemical Industry, 2017, 37:201—4.
- [10] 王宗伟, 戴景民, 何小瓦, 等. 超高温 FTIR 光谱发射率测量系统的线性度分析[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32:313—6.
- Wang Zongwei, Dai Jingmin, He Xiaowa, et al. Linearity analysis of ultra-high temperature FTIR spectral emissivity measurement system[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32:313—6.
- [11] 陈洪雷, 郝立超, 丁瑞军, 等. 红外焦平面器件线性度测试误差分析[J]. 激光与红外, 2012, 42:663—6.
- Chen Honglei, Hao Lichao, Ding Ruijun, et al. Error analysis of infrared focal plane device linearity measurement[J]. Laser and Infrared, 2012, 42:663—6.
- [12] 张俊祺, 原遵东, 赵军, 等. 材料光谱发射率测量装置线性度研究[J]. 计量技术, 2007, 6:5—7.
- Zhang Junqi, Yuan Zundong, Zhao Jun, et al. Study on linearity of material spectral emissivity measuring device[J]. Metrology, 2007, 6:5—7.
- [13] 宋旭尧, 端木庆铎, 董伟, 等. 基于光通量倍增法的傅里叶红外探测系统光谱响应度非线性测量[J]. 红外与毫米波学报, 2020, 39:409—16.
- Song Xuyao, Danmu Qingduo, Dong Wei, et al. Nonlinear measurement of spectral responsivity of Fourier infrared detection system based on flux multiplication method[J]. Journal of Infrared and Millimeter Wave, 2020, 39:409—16.
- [14] Liu X, Zhang Z, Feng G. A measurement device for the normal spectral emissivity of materials under low-temperature and vacuum conditions[J]. Applied Sciences (2076-3417), 2024, 14:(22).
- [15] 冯国进, 马宇轩, 梁凤臣, 等. 中红外光谱透射比标准物质研制[J]. 化学分析计量, 2020, 29:1—3.
- Feng Guojin, Ma Yuxuan, Liang Fengchen, et al. Development of standard material for mid-infrared spectral transmittance[J]. Chemical analytical Metrology, 2020, 29:1—3.