

红外光学系统光谱透射比校准技术

李四维 王学新 谢毅 郭羽 闫晓宇 杨毓鑫 张旭

Spectral transmittance calibration technology of infrared optical system

LI Siwei, WANG Xuexin, XIE Yi, GUO Yu, YAN Xiaoyu, YANG Yuxin, ZHANG Xu

引用本文:

李四维, 王学新, 谢毅, 等. 红外光学系统光谱透射比校准技术[J]. 应用光学, 2023, 44(4): 868–873. DOI: 10.5768/JAO202344.0403008

LI Siwei, WANG Xuexin, XIE Yi, et al. Spectral transmittance calibration technology of infrared optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(4): 868–873. DOI: 10.5768/JAO202344.0403008

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0403008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于硫系玻璃的紧凑型大相对孔径长波红外光学系统无热化设计

Compact large relative aperture long wavelength infrared athermalization optical system with chalcogenide glasses

应用光学. 2021, 42(5): 790–795 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0501005>

长焦红外光学系统焦距的高精度测量技术

High-precision measurement of focal length for long-focus infrared optical system

应用光学. 2017, 38(6): 995–998 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0606002>

含有双层衍射光学元件的中波/长波消热差光学系统的设计

Design of athermal MWIR/LWIR optical system with double-layer diffractive optical elements

应用光学. 2019, 40(5): 756–762 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0501007>

中波红外光学系统无热化设计和冷反射抑制

Athermalization and suppression of narcissus for medium-wave infrared optical system

应用光学. 2017, 38(3): 352–357 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0301003>

紧凑型大变倍比中波红外连续变焦光学系统设计

Compact MWIR continuous zoom optical system with large zoom range

应用光学. 2019, 40(1): 33–38 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0101006>

广角红外地球敏感器光学系统设计及畸变校正

Design of optical system of wide angle infrared earth sensor and study on distortion correction

应用光学. 2018, 39(2): 257–261 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0206001>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 04-0868-06

红外光学系统光谱透射比校准技术

李四维, 王学新, 谢毅, 郭羽, 闫晓宇, 杨毓鑫, 张旭

(西安应用光学研究所 国防科技工业光学一级计量站, 陕西 西安 710065)

摘要: 针对红外光学系统透射比参数无法准确测量的问题, 开展了红外光学系统光谱透射比测量和校准技术研究。通过对积分球法、大面积均匀源法等测量方法进行分析, 研究构建了基于回返射法的红外光学系统光谱透射比校准装置, 并建立了完整的光谱透射比量值溯源和量传链条。利用该装置实现了 $2\ \mu\text{m}\sim 14\ \mu\text{m}$ 波长范围的光谱透射比测量, 对测量结果进行不确定度分析, 结果为 2%。相对于以往的透射比测量装置, 该装置的测量结果具有更高的准确性和可靠性。

关键词: 红外光学系统; 光谱透射比测量; 回返射法; 测量不确定度

中图分类号: TN216

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0403008

Spectral transmittance calibration technology of infrared optical system

LI Siwei, WANG Xuexin, XIE Yi, GUO Yu, YAN Xiaoyu, YANG Yuxin, ZHANG Xu

(The First Scale Optical Metrology Station of the Science, Technology and Industry for National Defense, Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: Aiming at the problem that transmittance parameters of infrared optical system cannot be accurately measured, the measurement and calibration technology for spectral transmittance of infrared optical system were studied. Based on the analysis of measurement methods such as integrating sphere method and large-area uniform source method, a calibration device for spectral transmittance of infrared optical system based on method of reflection was studied and constructed, and the complete quantity traceability and quantity transmission chain of spectral transmittance were established. The device was used to measure the spectral transmittance in the wavelength range of $2\ \mu\text{m}\sim 14\ \mu\text{m}$, and the uncertainty analysis of the measurement results showed that the result was 2%. Compared with the previous measurement device, the measurement results of the proposed device have higher accuracy and reliability.

Key words: infrared optical system; measurement of spectral transmittance; method of reflection; measurement uncertainty

引言

随着红外成像系统的作用距离越来越远, 其光学系统也朝着大口径、长焦距的方向发展, 对于这类光学系统的光谱透射比测量精度要求也越来越高。光谱透射比是评价红外光学系统优良与否的关键性能指标, 为了准确评价红外光学系统透射比对红外成像系统成像质量及探测效率的影响, 需要对红外光学系统光谱透射比参数进行准确测量和校准。目前国内不少单位采用分光光度计或傅里叶光谱仪来测量滤光片等物方无限远光学系统的光谱透射比, 但无法对红外镜头满口径光谱

透射比进行测量。

针对以上情况, 本文分析比较了几种常用的透射比测量方法^[1-5], 研制了基于回返射法的红外光学系统光谱透射比校准装置。其测量波长范围为 $2\ \mu\text{m}\sim 14\ \mu\text{m}$, 可在一套装置内同时实现物方有限远(如红外镜头)和物方无限远(如红外光窗、光学平板)的红外光学系统光谱透射比高精度测量。

1 测量方法比较

光谱透射比又称光谱透射系数, 一般是指通过的辐射能量通量与入射的辐射能量通量光谱密集

收稿日期: 2022-05-26; 修回日期: 2022-11-04

基金项目: 国防科工局技术基础项目

作者简介: 李四维 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事红外计量测试研究。E-mail: 179034675@qq.com

度之比^[6]。采用何种红外光学系统透射比测量方法,对于被测样品的类型、测量结果的精度等影响都很大。在进行红外光学系统透射比测量时,最常用的方法有积分球法、均匀大面积辐射源法、全孔径透射比法和回返射法^[7-10],下面将对以上4种常用方法的优缺点进行比较。

1.1 积分球法

积分球法常用于测量可见光学系统轴向透射比,也可用来测量红外波段的光学镜头透射比。该方法的特点是:当辐射信号入射积分球后,由积分球内壁漫反射,探测器接收到的辐射信号只与进入积分球内的辐射能量大小(或积分球内壁辐照度)有关,而不取决于进入光束的截面积和张角。积分球法目前存在的问题是:若测量较大口径光学系统透射比,则积分球尺寸必须随之增大。大尺寸的积分球会严重降低系统的灵敏度,此时则需要提高红外探测器的灵敏度或增大探测器的尺寸,这样才能有效提高系统的信噪比,保证测量精度。

1.2 均匀大面积辐射源法

均匀大面积辐射源法采用均匀性良好的面源黑体作为光源。光源可直接由中继透镜会聚到探测器,也可经过被测透镜会聚到探测器。该方法的特点是,用中继透镜成像于探测器的接收面上,并采用定制的光阑来限制其数值孔径,中继透镜对光源成像光斑总是大于或完全覆盖探测器光敏面。为了提高探测系统的信噪比,采用斩波器对辐射信号进行调制,并通过锁相放大器输出调制信号,以获得较高的仪器灵敏度和精度。

均匀大面积辐射源法一般适用于测量单片透镜透射比。测量由多片透镜组成的望远系统时,由于加入中继透镜改变光线方向,因此虽有光阑的限制,但探测器接收到的辐射能量也会产生偏差。

1.3 全孔径透射比法

全孔径透射比法先用被测透镜将光线直接会聚到探测器像面上,此时探测器输出电信号 V_s 。然后将被测透镜移出光路,将探测器置于光源前方一已知距离处,探测器测得另一电信号 V_0 。此时需要准确测得探测器光敏面与光源之间的距离,还需要知道被测透镜的数值孔径。被测光学系统的透射比由式(1)可得:

$$\tau = \left(\frac{r^2}{l \cdot N_A} \right) \frac{V_s}{V_0} \quad (1)$$

式中: r 为辐射源有效半径; l 为空测时探测器光敏面距辐射源的距离; V_0 为空测时探测器输出信号; N_A 为其数值孔径; V_s 为实测时探测器输出信号。

当采用该方法测量准直光学系统时,需引入辅助准直光管,将光源放置在该准直光管的焦点上,此时将出射平行光。式(1)中的距离 l 为准直光管的焦距,在光路中加入光阑,用于限制光束直径,使其正好充满被测件的全孔径。

该方法可用于测量有限和无限共扼成像光学透镜满口径透射比,但无法进行大口径透镜满口径透射比测量。采用该方法需要测量长度量 r 和 l ,电压值 V_0 和 V_s ,以及角度 NA 值,这些参量都有可能引入测量误差。同时还需要较大尺寸的均匀面辐射源,以及灵敏度均匀的探测器。

1.4 回返射法

回返射法采用光的回返射原理实现光学系统透射比的测量,适用于光学平板、红外光学镜头等不同类型的光学系统。黑体辐射源的出射辐射经离轴抛物面反射镜准直后,以平行光束入射到半透半反镜和被测透镜上,而后由平面回返射镜将光束返回,再经过检测透镜、半透半反镜后,最后用离轴抛物面反射镜将准直光束聚焦到探测器的像面上。斩波器用于将直流信号调制为交流信号,可以提升信噪比,增强装置的探测灵敏度。

该方法的主要特点是,检测时需精确调整平面回返射镜,使其位于被测透镜的焦平面上。该方法操作简便,而且能够测量大口径红外光学系统满口径透射比。但该方法结构较为复杂且造价较高,同时对于平面回返射镜与被测透镜之间的定位精度要求很高,容易引入较大的测量误差。

由于积分球法会降低系统探测信噪比,所以更适合测试可见光系统;均匀大面积辐射源法会引入中继透镜;全孔径透射比法会引入辐射源有效半径、测试距离、数值孔径等参量,这些都有可能引入测量误差,导致测量结果误差较大。综合比较4种方法的优缺点,根据测量对象和高精度测量的需求,本文最终选择了回返射法来进行红外光学系统光谱透射比的测量。

2 红外光学系统光谱透射比校准装置组成

红外光学系统光谱透射比校准装置采用回返射法测量原理,可以在一套装置中同时实现物方

有限远镜头(如光学镜头)和物方无限远(如红外光窗、光学平板)光学系统光谱透射比的准确测量,解决了采用传统的辅助透镜法自身透射比难以准确消除,以及积分球法能量弱、信噪比低等问题,从原理上保证了光谱透射比的准确测量。校准装置原理框图如图 1 所示。

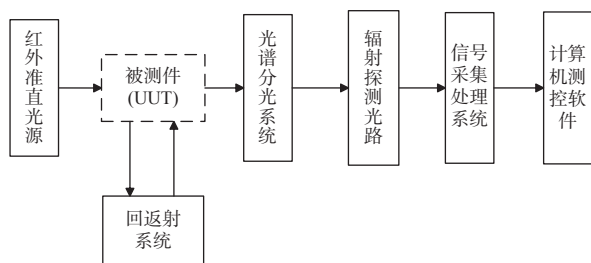


图 1 校准装置原理框图

Fig. 1 Schematic block diagram of calibration device

红外准直光源发出的平行光经过被测件后,被回返射系统沿原路返回,两次经过被测件后,平行光入射到红外光谱分光系统。红外光谱分光系统用于光谱分光,将红外复色光细分为连续单色红外光;辐射探测主光路用于将平行光束会聚到红外单元探测器上,并实现光电转换;信号采集处理系统用于模拟电信号处理和模数转换;计算机测控软件用于光谱透过率测量的控制和数据处理。测量物方有限远红外光学系统光谱透射比时,需要调节回返射镜的距离,使其正好位于被测件的焦面上,并通过调节回返射镜的方位和俯仰角,使反射光线能沿着入射的路径原路返回。

采用回返射法测量时,由于光线两次透过被测样品,故光谱透射比的定义可用式(2)表示为

$$\tau(\lambda) = \sqrt{\frac{V'(\lambda) - V_0(\lambda)}{V(\lambda) - V_0(\lambda)}} \quad (2)$$

式中: $\tau(\lambda)$ 为被测光学系统的光谱透射比; $V(\lambda)$ 为被测样品未进入光路时探测器对特定波长输出电压值; $V'(\lambda)$ 为被测样品进入光路时探测器对特定波长输出电压值; $V_0(\lambda)$ 为背景测量时探测器对特定波长输出电压值。

2.1 红外准直光源

红外准直光源用于产生测试所需要的红外平行光,由黑体辐射源、半透半反镜和准直抛物面反射镜组成。采用黑体辐射源作为红外光源,能够提供不同辐射温度的标准红外辐射信号。半透半反镜的作用是先将被体出射的红外辐射反射进入准直抛物面反射镜,由回返射系统两次透射被测

的红外光学系统后的光束,再经由半透半反镜透射进入分光 and 辐射探测系统。准直抛物面反射镜的主要作用是将半透半反镜反射的黑体辐射准直,使得红外辐射以平行光入射被测红外光学系统。

2.2 回返射系统

回返射系统用于将平面波或球面波原路返回,包括平面回返射镜、孔径光阑和多维精密调整机构等。孔径光阑用于限制通光孔径的大小,调节探测器接收的能量,提高测量范围,同时根据客户需求使得其与被测红外光学系统孔径一致。多维调整机构用于放置平面回返射镜,并通过前后、方位、俯仰调节使得平面回返射镜位于被测照相光学系统的焦面上,此时才能使入射光线沿着原路返回,避免由于定位不准引入的测量误差。

2.3 光谱分光系统

红外光谱分光技术目前主要有三种分光方式:光栅分光、圆形渐变滤光片分光和傅里叶分光。光栅分光利用衍射实现分光,其中光栅采用电机控制,扫描一次时间较长,测量速度慢。圆形渐变滤光片分光利用渐变滤光片旋转实现分光,实际上是由多个滤光片组成,其光谱分辨率比较低,目前光谱分辨率最大为对应波长的 1%。按波长 $10 \mu\text{m}$ 计算,其分辨率仅为 $0.1 \mu\text{m}$,很难捕捉被测样品透过率的光谱细节。傅里叶光谱分光装置具有扫描速度快、灵敏度高、光谱分辨率高、光通量高、信噪比高、杂散光抑制能力强等优点,适合用于快速高精度测量^[11-12]。由于傅里叶光谱分光系统分辨率较高、光通量高、测量速度快,对于本身信号比较弱的红外信号探测非常有利,故本文选择傅里叶光谱分光系统来实现光谱分光。傅里叶光谱分光系统的原理如图 2 所示。

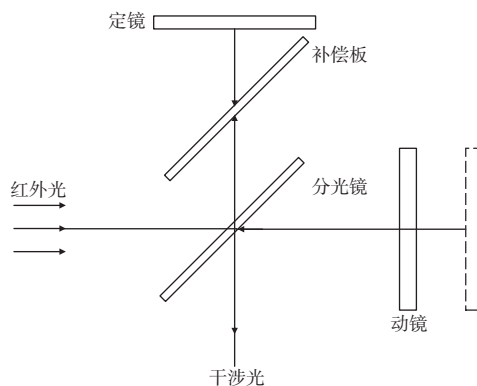


图 2 傅里叶光谱分光系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of system for FTIR

2.4 红外辐射探测光路

红外辐射探测光路用于将红外光谱分光系统的平行辐射会聚到红外探测器的光敏面上, 由会聚抛物面反射镜和红外探测器组成。

会聚抛物面反射镜主要用于将光谱分光装置出射的平行光会聚到探测器, 其采用全反射设计, 表面镀银膜, 在红外波段平均反射率大于 95%, 满足波长范围 2 μm~14 μm 的要求。红外探测器主要用于将光信号转化为电信号, 由于能决定光能利用率, 因此其性能对信号探测非常重要。探测器在中红外区主要用 DLATGS 探测器和 MCT 探测器, DLATGS 探测器响应效率较 MCT 探测器小 1~2 个量级。为了提升系统的探测效率, 本文选择液氮制冷的 MCT 探测器。

2.5 信号采集处理系统

红外探测器将光信号转化为电信号, 通过信号处理系统被计算机接收并处理。在探测器信号处理模块中, 红外探测器接收到的是微弱信号。由于微弱信号探测容易受到环境和电场的干扰, 因而探测器信号电路全部安装在一个屏蔽罩内, 尤其是前放电路, 除了采用外壳屏蔽外, 其与探测器的数据线采用屏蔽线, 确保信号不受干扰。为了适应不同信号强度的探测, 探测器信号处理模块增加了增益调节功能。探测器信号处理模块组成如图 3 所示。

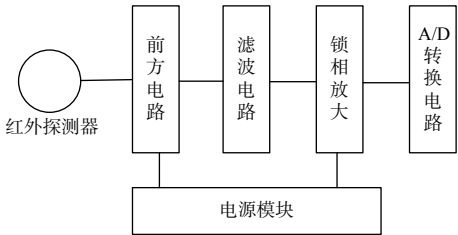


图 3 信号采集处理系统原理框图

Fig. 3 Schematic block diagram of system for signal acquisition and processing

3 实验结果及测量不确定度分析

3.1 实验结果

本文分别采用国防科技工业光学一级计量站的红外滤光器透射比测量装置和红外光学系统校准装置, 对 2 μm~14 μm 波段的中性密度滤光片样品进行了光谱透射比测量。测量实验之前, 首先测出背景辐射电压 $V_0(\lambda)$ 。设置黑体温度, 待黑体升温至设置温度点后, 继续稳定 30 min, 再对黑体辐

射进行空测。探测器对黑体辐射输出的电压为 $V(\lambda)$, 探测器输出电压信号经过放大处理后, 通过千兆以太网, 由计算机进行采集、保存和处理。然后将被测样品放入测量光路, 黑体辐射经过两次透过被测样品后, 最终入射至探测器。探测器输出电压信号 $V'(\lambda)$ 经过放大处理后, 运行编好的程序可以输出待测滤光片的光谱透射比 $\tau(\lambda)$, 也可输出被测滤光片的波段平均透射比。

随后, 采用国防科技工业光学一级计量站的红外滤光器透射比测量装置, 对 2 μm~14 μm 波段的中性密度滤光片样品进行测量, 测量结果如表 1 所示。

表 1 2 μm~14 μm 波段的中性密度滤光片透射比测量结果
Table 1 Measurement results of transmittance of neutral density filter in 2 μm~14 μm band

测量次数	测量装置	
	红外滤光器透射比 测量装置/%	红外光学系统光谱 透射比较准装置/%
1	56.86	56.71
2	56.68	57.44
3	56.87	57.40
4	56.66	57.81
5	56.79	57.02
6	56.76	57.32
平均值	56.77	57.27
相对标准偏差	0.30	1.00

由表 1 的测量结果可以看出, 本装置与红外滤光器透射比测量装置的相对偏差为 0.90%, 一致性较好。

3.2 测量不确定度分析

根据红外光学系统光谱透射比较准装置的组成、工作原理和测量过程, 分析得出发射率测量重复性主要来源于以下 7 个方面^[13-15]。

1) 黑体辐射源温度引入的测量不确定度分量 u_1 。
黑体辐射源要求的温度不确定度为 0.25 °C 或 $T \times 0.25\%$ 的最大值, 假设为正态分布, 则置信概率为 95%, $k = 2$ 。按 B 类方法评定, 当黑体温度为 50 °C 时, 测量不确定度最大, 所以黑体辐射源温度不准引入的测量不确定度分量 u_1 为

$$u_1 = \frac{0.25}{2 \times 50} \times 100\%$$

2) 黑体辐射源发射率引入的测量不确定度分量 u_2 。

黑体辐射源的发射率为 0.990 ± 0.005 , 假设为正

态分布,置信概率为 95%, $k=2$ 。按 B 类方法评定,参考黑体发射率不准引起的相对不确定度 u_2 为

$$u_2 = \frac{5 \times 10^{-3}}{2 \times 0.99} = 0.25\%$$

3) 杂散辐射引入的测量不确定度分量 u_3 。

杂散辐射是指照射到仪器探测器上的、与测量波长不同的其他波长的辐射,单色器光谱带范围内的波长辐射一般不看作杂散辐射。杂散辐射与照射到探测器上的所有波长的辐射之比称为杂散辐射率。杂散辐射率直接影响测量结果,在仪器波长的极端处,光源的强度降低或者探测器的灵敏度下降会使得杂散辐射变大,按 B 类方法评定,则:

$$u_3 = 0.30\%$$

4) 探测器系统非线性引入的测量不确定度分量 u_4 。

探测器系统非线性引入的测量不确定度分量由探测器校准证书和使用说明书给出,最大为 1%。取最大不确定度,按 B 类方法评定,假设为正态分布,置信概率为 95%, $k=2$,则标准不确定度 u_4 为

$$u_4 = 1.00\%/2 = 0.50\%$$

5) 漂移引入的测量不确定度分量 u_5 。

漂移引入的测量不确定度分量 u_5 可由实验得到,实验测得装置的漂移不超过 0.30%,按 B 类方法评定,则:

$$u_5 = 0.30\%$$

6) 回返射镜调节定位不准引入的测量不确定度分量 u_6 。

回返射镜调节定位不准引入的测量不确定度分量不超过 0.50%,按 B 类方法评定,则:

$$u_6 = 0.50\%$$

7) 测量重复性引入的测量不确定度分量 u_7 。

测量重复性引入的测量不确定度分量,按 A 类方法评定,则:

$$u_7 = 1.00\% / \sqrt{6} = 0.40\%$$

由于各不确定度分量之间独立且不相关,则合成测量不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2} = 1.00\%$$

取 $k=2$,则相对扩展不确定度 U 为

$$U = ku_c = 2.00\%。$$

4 结论

本文研制了一种红外光学系统光谱透射比较

准装置,具有光谱宽、光谱分辨率高的特点。对测量结果进行分析,结果表明,该系统实现了 $2\mu\text{m} \sim 14\mu\text{m}$ 宽光谱范围内的透射率测量,且测量结果与红外滤光片测量装置的相对偏差小于 1%,并对测量结果进行不确定度分析,测量不确定度为 2%。相对于以往的透射比测量装置,该装置的测量结果具有更高的准确性和可靠性。研制的光学瞄具宽光谱透射率检测系统可实现对红外镜头、红外光窗等不同类型光学系统的测量,对红外光电武器系统成像质量和探测效率的提升具有实际意义。

参考文献:

- [1] 冯国进,王煜,陶红. 中红外光谱规则透射比量值比对[J]. 计量科学与技术, 2013(4): 54-56.
FENG Guojin, WANG Yu, TAO Hong. Comparison of regular transmittance values in mid-infrared spectrum[J]. Metrology Science and Technology, 2013(4): 54-56.
- [2] 薛庆生,王淑荣,宋克非,等. 高精度光谱辐射计测量超低光谱透过率[J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1534-1539.
XUE Qingsheng, WANG Shurong, SONG Kefei, et al. Measurement of ultralow spectral transmissivity by high-precision spectral radiometer[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(10): 1534-1539.
- [3] 周磊,郑小兵. 高精度分光光度计测量光谱透过率[J]. 光电工程, 2006, 33(12): 32-38.
ZHOU Lei, ZHENG Xiaobing. High-accuracy spectrometer for measurement of spectral transmissivity[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(12): 32-38.
- [4] 范纪红,侯西旗,袁良,等. 光学元件高反射比、高透射比测试技术研究[J]. 应用光学, 2011, 32(6): 1184-1188.
FAN Jihong, HOU Xiqi, YUAN Liang, et al. High reflectance and high transmittance measurement for optical elements[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(6): 1184-1188.
- [5] 柳鸣,张国玉,安志勇,等. 光学瞄具宽光谱透射率检测及误差影响因素分析[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(6): 86-91.
LIU Ming, ZHANG Guoyu, AN Zhiyong, et al. Optical transmissivity detection with wide spectrum for optic aiming device and analysis of its influencing factors[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2014, 51(6): 86-91.
- [6] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 光学仪器术语: GB/T 13962—2009[S]. 北京: 中

- 国家标准出版社, 2010: 70.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Optical Instruments Vocabulary: GB/T 13962 —2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010: 70.
- [7] 王德安. 1~13 μm 红外透镜透射比测试[J]. 红外与激光技术, 1990, 19(2): 41-44.
- WANG Dean. Measurement of transmittance of 1~13 μm infrared lens[J]. Infrared and Laser Engineering, 1990, 19(2): 41-44.
- [8] 王德安. 热成像透镜系统透射比测量方法[J]. 红外技术, 1990, 12(3): 13-16.
- WANG Dean. Measurement method of transmittance of thermal imaging lens system[J]. Infrared Technology, 1990, 12(3): 13-16.
- [9] 杨红, 赵宝珍. 红外光学系统透射比测量[C]//第九届全国光学测试学术讨论会. 厦门: 中国光学学会光学测试专业委员会, 2001: 61-64.
- YANG Hong, ZHAO Baozhen. The measurement of the transmittance for IR optical systems[C]//The Ninth National Symposium on Optical Testing. Xiamen: Optical Testing Committee of Chinese Optical Society, 2001: 61-64.
- [10] 郝云彩, 杨淙泉. 大孔径相机系统透过率测量新方法研究[J]. 航天返回与遥感, 1996, 17(4): 22-29.
- HAO Yuncai, YANG Congquan. A new testing method of transmittancy of camera with large aperture[J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 1996, 17(4): 22-29.
- [11] 吴瑾光. 近代傅里叶变换红外光谱技术及应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994: 251-301.
- WU Jinguang. Modern Fourier transform infrared spectroscopy technology and its application[M]. Beijing: Scientific and Technical Documents Publishing House, 1994: 251-301.
- [12] BELL R J. Fourier transform spectroscopy[M]//Introductory Fourier transform spectroscopy. Amsterdam: Elsevier, 1972: 1-15.
- [13] International Standardization Organization. Guide to the expression of uncertainty in measurement: JCGM 100: 2008[S]. Switzerland: [s. n.], 1993: 37-38.
- [14] 国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评价与表示: JJF1059.1-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 18-23.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Evaluation and Expression of Uncertainty in Measurement: JJF1059.1-2012[S]. Beijing: Standards Press of China, 2012: 18-23.
- [15] 孟祥文. 紫外、可见分光光度计波长及透射比示值误差测得值的不确定度评定[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(10): 114-116.
- MENG Xiangwen. Uncertainty evaluation in measurement of wavelength and transmittance indication errors of ultraviolet and visible spectrophotometers[J]. Metrology and Measurement Technique, 2019, 46(10): 114-116.