

透射式能见度仪定标光源光谱模拟方法

梁婧¹, 张国玉^{1,2,3*}, 张健^{1,2,3}, 崇伟^{1,4}, 徐达^{1,2,3}, 孙继亮¹, 运志坤¹¹ 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;² 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130022;³ 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;⁴ 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

摘要 透射式能见度仪的校准结果无法溯源到世界气象组织对气象光学视程(MOR)的定义, 如何实现 MOR 定义中 2700 K 白炽灯的光谱模拟已成为透射式能见度仪定标技术亟待解决的关键问题, 故对透射式能见度仪定标光源的光谱模拟方法进行了研究。首先, 从理论上分析了光谱不匹配对透射式能见度仪定标的影响, 建立了满足透射式能见度仪定标精度要求的光源光谱分布判别依据, 得出透射式能见度仪定标光源的光谱模拟误差应优于 $\pm 5.5\%$ 的结论。然后, 基于一种数字微镜器件(DMD)的透射式能见度仪定标光源系统, 在遗传算法基础上, 提出了一种基于无余均分机制的光谱模拟方法, 以均分 800 列 DMD 微镜阵列面为前提, 通过不断均匀划分 DMD 阵列面的方式增加光谱拟合单元数量, 实现了 2700 K 绝对色温的光谱模拟。最后, 测试了 20, 50, 80 个基础光谱拟合单元对应的定标光源的光谱分布, 并进行了不确定度分析。测试结果表明, 80 个基础光谱拟合单元对应的定标光源光谱模拟误差为 $\pm 5.3\%$, 扩展不确定度为 4.04%。

关键词 大气光学; 透射式能见度仪; 能见度; 定标光源; 光谱模拟

中图分类号 TH765

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0601005

Spectral Simulation Method for Calibration Light Source of Transmissometers

Liang Jing¹, Zhang Guoyu^{1,2,3*}, Zhang Jian^{1,2,3}, Chong Wei^{1,4}, Xu Da^{1,2,3},
Sun Jiliang¹, Yun Zhikun¹¹ School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;² Opto-Electronic Measurement and Control Instrumentation, Jilin Province Engineering Research Center, Changchun, Jilin 130022, China;³ Key Laboratory of Opto-Electronic Measurement and Optical Information Transmission Technology, Ministry of Education, Changchun, Jilin 130022, China;⁴ Meteorological Observation Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China;

Abstract The calibration results of the transmissometers cannot be traced to the definition of meteorological optical range (MOR) of the World Meteorological Organization. How to realize the spectrum simulation of the 2700 K incandescent lamp in the MOR definition has become a key issue that needs to be solved urgently in the calibration technology of the transmissometers, so the spectral simulation method of calibration light source of the transmissometers is studied. First, the influence of spectral mismatch on the calibration of the transmissometers is analyzed theoretically, and the basis for discriminating the spectral distribution of the light source that meets the calibration accuracy requirements of the transmissometers is established. It is concluded that the spectral simulation errors of the calibration light sources of the transmissometers should be better than $\pm 5.5\%$. Then, based on a transmissometer calibration light source system with digital micromirror device (DMD), and on the basis of genetic

收稿日期: 2021-07-19; 修回日期: 2021-09-22; 录用日期: 2021-10-25

基金项目: 国家自然科学基金(62075019)、吉林省科技厅项目(20200401046GX)、长春理工大学科技创新基金(XJLJG-2018-02)

通信作者: *zh_guoyu@163.com

algorithm, a spectral simulation method based on a uniform division mechanism without residues is proposed. On the premise of dividing uniformly the array surface of DMD micro mirrors into 800 columns, the number of fitting units is increased by uniformly dividing the DMD array surface, and the spectral simulation of absolute color temperature of 2700 K is realized. Finally, the spectral distribution of the calibration light source corresponding to 20, 50, and 80 basic spectral fitting units is tested, and the uncertainty is analyzed. The test result show that the spectral simulation error of the calibration light source corresponding to the 80 basic spectral fitting units is $\pm 5.3\%$, and the expanded uncertainty is 4.04% .

Key words atmospheric optics; transmissometer; visibility; calibration light source; spectral simulation

1 引言

能见度与大气环境息息相关,对我国环境监测与保护和气象预测与预报等十分重要,在军事、交通、航空和航海等领域也有着重要的应用。世界气象组织(WMO)用气象光学视程(MOR)表示能见度,其定义为 2700 K 色温的光通量经白炽灯平行发出后,经过大气削弱后降低到初始值的 5% 时所通过的路径长度^[1]。

从 1989 年 WMO 开展大规模人工观测视程与各类仪器观测 MOR 比对实验,到 2018 年采用图像观测视程的能见度观测仪器与透射式能见度仪进行比对实验期间,测量能见度的主要仪器有透射式能见度仪、前向散射式能见度仪、后向散射式能见度仪、数字摄像式能见度仪以及激光雷达等^[2]。

透射式能见度仪的发射器和接收器分别放置在探测样本两端,直接测量光辐射在样本大气中的透过率,进而换算出大气消光系数,反演得出大气能见度。同时,测量过程与 MOR 的定义紧密相关^[3]。相较其他能见度测量仪器,透射式能见度仪测量精度较高,尤其是在低能见度情况下检测性能好。因此,国际民航组织(ICAO)推荐将透射式能见度仪作为机场跑道等大气水平能见度测量场合的能见度测量仪器。

由于透射式能见度仪长期工作在雨、雪和大风等天气的室外环境中,故对它的校准十分困难。同时,缺乏定期对透射式能见度仪的实验室校准设备。因此,目前尚无统一的透射式能见度仪检定规程。

针对透射式能见度仪的校准,国内外主要有两种方法。第一种是组织各家仪器进行比对。例如,利用透射式能见度仪与前向散射式能见度仪对比,在高 MOR 实验条件下,将前向散射式能见度仪作为能见度标准器,通过长期对比实验得到的数据来评价透射式能见度仪的测量性能^[4-6]。然而,用于前向散射式能见度仪校准的标准散射体^[7-8]定标过程仍然依赖透射式能见度仪与前向散射式能见度仪的

外场比对实验,易受天气状况影响,定标效率低,且定标后的标准散射体无法溯源到 MOR 定义。

第二种是采用人工外挂中性密度衰减片的方式进行透射式能见度仪的校准,重复校准悬挂于透射式能见度仪发射镜头前端透射率值高、中、低 3 个类别的中性密度衰减片^[9]。2006 年,荷兰皇家气象研究所提出了一种利用透射式能见度仪、前向散射式能见度仪、中性密度衰减片和标准散射体的前向散射式能见度仪的校准方法^[6],该方法可将前向散射式能见度仪 MOR 测量值溯源到室内对中性密度衰减片透过率的定标精度。2015 年,韩国标准与科学研究所(KRIS)提出了一种可溯源到国际单位制的基线长度为 75 m 的透射式能见度仪的室内校准方法^[10],将 MOR 测量结果溯源到 KRIS 对中性密度衰减片光谱透过率的定标结果。虽然这种方法能够将中性密度衰减片的定标结果溯源到光谱透过率,但是世界各国的厂商都采用自己的相对参考基准来评价各自中性密度衰减片的精度,并无统一的光谱透过率检验基准。此外,中性密度衰减片的校准光源多为国际照明委员会(CIE)标准照明体 A 的光谱分布,与 MOR 定义中 2700 K 色温白炽灯光谱分布不匹配,故中性密度衰减片的校准结果仍然无法溯源到 MOR 定义。因此,无论哪种方法,能见度的测量值与实际真值间必然存在偏差。综合国内外研究现状,目前鲜有 2700 K 色温白炽灯光谱模拟的相关报道。由于缺乏相关光源,故符合 MOR 定义的透射式能见度仪的校准程序无法建立。因此,2700 K 白炽灯光谱分布的精确模拟对透射式能见度仪定标技术的研究至关重要。

目前,国内外现有文献关于探测光源的光谱分布变化对能见度的影响鲜有阐述,也少有具体的光谱匹配与能见度测量精度的相关性研究。虽然对 380~780 nm 波段范围内的 2700 K 色温光谱模拟研究较少,但是在宽波段光谱模拟取得了一定的进展。美国国家标准与技术研究院(NIST)搭建了基于多通道发光二极管(LED)光源的光谱可调照明系

统,可覆盖 440~640 nm 的波长范围。此外,他们提出了一种基于梯度下降的光谱匹配算法,光谱模拟误差小于 7.6%^[11]。Burgos 等^[12]搭建了一个装有 31 通道的 LED 面板的积分型立方体箱,提出了一种基于内点算法的光谱匹配方法,在 400~700 nm 波长范围内获得了 7.5% 的光谱精度。国内徐达等^[13]设计了一种基于 LED 的多色温积分光源,通过增加 LED 的数量和种类在一定程度上提高了目标光谱的模拟精度,光谱模拟误差优于 10%。Xu 等^[14]从工程实践的角度基于最小二乘算法进一步确定了匹配太阳光谱所需的 34 种最佳 LED 芯片,光谱模拟误差优于 10%。由此可见,针对特定的应用,众多学者研究了不同的光谱匹配方法。然而,多数研究都是选用固定的光谱拟合单元,其光谱匹配精度受所选光谱拟合单元数量和光谱特性的限制,无法进一步提高。

针对以上问题,本文从现有能见度经验公式和黑体的辐射定律出发,理论分析了光源光谱分布对透射式能见度仪定标精度的影响,得出了定标光源的光谱模拟误差。基于一种数字微镜(DMD)的透射式能见度仪定标光源系统,在遗传算法的基础上,提出了一种基于无余均分机制的光谱模拟方法,实现了对色温为 2700 K 的白炽灯光谱分布的光谱匹配。本文所研究的定标光源可以用于一定范围的中性密度衰减片室内定标,通过定标后的中性密度衰减片校准透射式能见度仪,实现室内环境下能见度的溯源,可为后续建立符合 WMO 规定的透射式能见度仪定标系统提供技术支撑。

2 光谱不匹配对透射式能见度仪定标的影响分析

2.1 透射式能见度仪定标的精度分析

能见度测量基础理论是 Koschmieder 定律。根据 Koschmieder 定律^[15]可得 MOR 表示的能见度 M_{MOR} 与消光系数 $\sigma(\lambda)$ 的关系

$$M_{\text{MOR}} = \frac{-\ln \epsilon}{\sigma(\lambda)}, \quad (1)$$

式中: ϵ 为视觉对比阈值; λ 为光辐射的波长。

设均匀介质的透过率为 τ ,指光经过给定长度的光学路径后剩余光辐射量的百分数。根据 Beer-Lambert 定律^[15],平行光通过距离为 L 的均匀介质后,在大气中的衰减可表示为

$$\tau = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = \exp[-\sigma(\lambda)L], \quad (2)$$

式中: $I_0(\lambda)$ 为入射光辐射强度; $I(\lambda)$ 为出射光辐射强度。

根据 WMO 规定, $\epsilon = 0.05$ ^[16]。此时,由(1)、(2)式可得大气能见度公式

$$M_{\text{MOR}} = \frac{L \ln 0.05}{\ln \tau}. \quad (3)$$

(3)式反映了透射式能见度仪工作原理,通过直接测量光发射机和光接收机之间散射和吸收引起的透过率,即可得出能见度值。此时,透射式能见度仪的基线长度即为平行光通过的距离(L)。

根据(3)式,可用已知光谱透过率的中性密度衰减片校准透射式能见度仪。在给定透射式能见度仪基线长度 L 的前提下即可得出中性密度衰减片在理论上模拟得到的能见度,将其与透射式能见度仪实际测得的能见度进行比较可实现室内环境下能见度的溯源。此时,能见度的定标可转化为中性密度衰减片光谱透过率的定标。

对(3)式进行微分,且不考虑基线长度误差。当接收端光源的发光照度稳定时,透射式能见度仪的透过率误差与能见度误差的关系式为

$$\frac{d\tau}{\tau} = -\frac{L \ln 0.05}{M_{\text{MOR}}} \cdot \frac{dM_{\text{MOR}}}{M_{\text{MOR}}}. \quad (4)$$

将(3)式代入(4)式,可得

$$d\tau = -\frac{L \ln 0.05}{M_{\text{MOR}}} \cdot \exp\left(\frac{L \ln 0.05}{M_{\text{MOR}}}\right) \cdot \frac{dM_{\text{MOR}}}{M_{\text{MOR}}}. \quad (5)$$

由(5)式可知,透射式能见度仪透过率的绝对误差与基线长度、 M_{MOR} 范围和 M_{MOR} 相对误差有关。对于透射式能见度仪,部分典型基线长度分别为 10, 20, 30, 50, 75 m^[17]。

透射式能见度仪被广泛应用于测量机场的跑道视距(RVR)。根据 ICAO 规定,考虑完整的 RVR 范围,透射式能见度仪需要覆盖的 M_{MOR} 范围为 50~2000 m^[18],故将 M_{MOR} 范围定为 20~2500 m。

将前向散射式能见度仪与透射式能见度仪对比,可将前向散射式能见度仪溯源到透射式能见度仪,透射式能见度仪再通过中性密度溯源到光谱透过率。根据文献^[19]:当 $M_{\text{MOR}} < 200$ m 时, M_{MOR} 的示值误差为 $\pm 15\%$;当 $200 \text{ m} \leq M_{\text{MOR}} < 1500$ m 时, M_{MOR} 的示值误差为 $\pm 10\%$;当 $M_{\text{MOR}} > 1500$ m 时, M_{MOR} 的示值误差为 $\pm 20\%$ 。因此,将作为前向散射式标准校准设备的透射式能见度仪的 M_{MOR} 的定标精度设定如下:

1) 当 $20 \text{ m} \leq M_{\text{MOR}} < 200$ m 时,最大允许误差

范围为 $-10\% \sim 10\%$, 即 $\frac{dM_{MOR}}{M_{MOR}} \leq 10\%$ 。

2) 当 $200 \text{ m} \leq M_{MOR} < 1500 \text{ m}$ 时, 最大允许误差

差范围为 $-5\% \sim 5\%$, 即 $\frac{dM_{MOR}}{M_{MOR}} \leq 5\%$ 。

3) 当 $1500 \text{ m} < M_{MOR} \leq 2500 \text{ m}$ 时, 最大允许误差

差范围为 $-15\% \sim 15\%$, 即 $\frac{dM_{MOR}}{M_{MOR}} \leq 15\%$ 。

分别将透射式能见度仪的典型基线长度和 M_{MOR} 范围代入 (5) 式, 满足透射式能见度仪的 M_{MOR} 定标精度要求, 即可求出透过率最大允许误差 τ_{max} , 如表 1 所示。

表 1 不同基线长度下透过率的最大允许误差

Table 1 Maximum allowable error of transmittance at different baseline lengths

Calibration accuracy of $M_{MOR}/\%$	Baseline length / m				
	10	20	30	50	75
± 10	± 0.0129000	± 0.0149000	± 0.0050000	± 0.0004000	± 0.0000145
± 5	± 0.0009000	± 0.0019000	± 0.0028000	± 0.0045000	± 0.0064000
± 15	± 0.0017000	± 0.0035000	± 0.0052000	± 0.0084000	± 0.0123000

由表 1 可知, 满足透射式能见度仪 3 个 M_{MOR} 精度要求的透过率最大误差应为 3 个透过率最大误差值中的最小值, 即典型基线长度 10, 20, 30, 50, 75 m 所对应的透过率最大允许误差分别为 $\pm 0.0009000, \pm 0.0019000, \pm 0.0028000, \pm 0.0004000,$

± 0.0000145 。由于已经分析出基线长度与其相应的透过率最大允许误差存在一一对应关系, 故选用基线长度来评价 M_{MOR} 的相对误差。以基线长度评价的 M_{MOR} 的误差曲线及其局部放大图, 如图 1 所示。

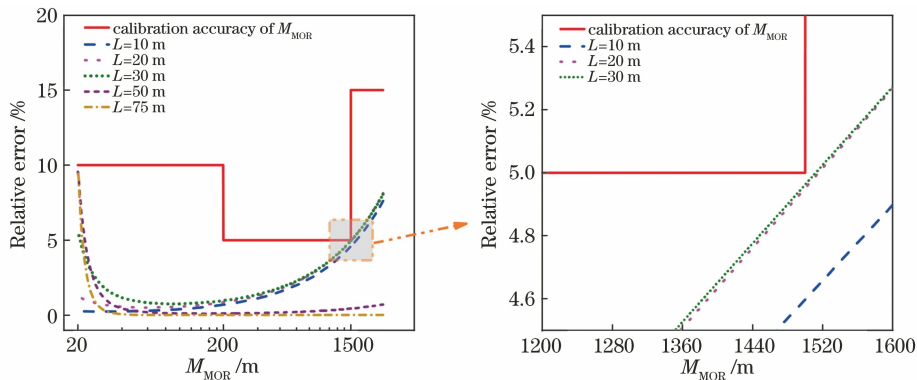


图 1 典型基线长度下满足透射式能见度仪定标精度的 M_{MOR} 的相对误差及其局部放大图

Fig. 1 Relative errors of M_{MOR} satisfying calibration accuracy of transmissometer at typical baseline lengths and local magnification

由图 1 看出, M_{MOR} 相对误差在 M_{MOR} 范围内分布不均。在基线长度为 10 m 情况下, M_{MOR} 相对误差曲线呈单调递增趋势。在基线长度为 20, 30, 50 m 情况下, M_{MOR} 相对误差曲线呈“U”形分布。在基线长度为 75 m 情况下, M_{MOR} 相对误差曲线呈单调递减趋势。其中, 基线长度为 10 m 和 20 m 情况下的 M_{MOR} 精度随着 M_{MOR} 范围的扩大而提高。在 M_{MOR} 接近上限、高能见度情况下, M_{MOR} 的相对误差骤增。在基线长度为 30 m 情况下, 在 M_{MOR} 相对误差曲线的两端, 当 M_{MOR} 接近上下限时, 误差呈指数增长。也就是说, 在低能见度和高能见度情况下, M_{MOR} 的相对误差会骤增。在基线长度为 50 m 和 75 m 情况下, 当 M_{MOR} 接近下限、低能见度时, M_{MOR} 的相对误差骤增。

2.2 透射式能见度仪定标光源系统光谱模拟精度的分析

大气的特性会导致大气在可见光区域的光谱透过率不同^[20], 此时的大气光谱透过率 $\tau(\lambda)$ 和透射式能见度仪测得的大气透过率 τ 之间的关系为

$$\tau = \frac{\int_{380}^{780} \tau(\lambda) S(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} S(\lambda) V(\lambda) d\lambda}, \quad (6)$$

式中: $S(\lambda)$ 为透射式能见度仪定标光源的光谱分布; $V(\lambda)$ 为 CIE 推荐的人眼平均光谱光视效率。光谱辐射波长的范围为 380~780 nm。定标光源光谱分布与 2700 K 色温白炽灯光谱分布的差异引起的透过率误差会使得 MOR 无法溯源到 WMO 的定义

中,这就是光谱不匹配对透射式能见度仪定标的影响。

对于白炽灯等热辐射源,由于其光谱分布与黑体比较接近,它们的色品坐标点基本处于黑体轨迹上,故 2700 K 色温白炽灯的光谱分布 $S_0(\lambda)$ 可由普朗克辐射定律^[21]求得,其表达式为

$$S_0(\lambda) = \frac{c_1}{\lambda^5 \cdot \left[\exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]}, \quad (7)$$

式中:第一辐射常数为 $c_1 = 3.74183 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$; 第二辐射常数为 $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$;绝对色温为 $T = 2700 \text{ K}$ 。

根据 MOR 定义可知,2700 K 色温白炽灯光源对应的大气透过率为 $\tau_0 = 5\%$,则满足透射式能见度仪定标精度要求的光源光谱分布的判别依据为

$$\frac{\int_{380}^{780} \tau_0(\lambda) S(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int_{380}^{780} S(\lambda) V(\lambda) d\lambda} - \tau_0 \leq \tau_{\max}, \quad (8)$$

式中: $\tau_0(\lambda)$ 为能见度定义时的模拟大气光谱透过率。

采用 MODTRAN 大气辐射传输模型的 1976 年美国标准大气、热带、中纬度夏季、中纬度冬季、副极带夏季和副极带冬季大气环境模型下的可见光波段大气透过率随波长变化的规律^[22]反演整层大气的光谱透过率,并且 6 种大气环境模型包含了水汽、二氧化碳、氧气、大气分子和气溶胶造成的衰减。虽然大气成分中含有的不同分子对光的吸收能力不同,但是成分比较稳定^[23]。因此,在 6 种典型大气环境条件下,虽然可见光波段的透过率随波长变化有所不同,但是趋势基本一致。

当 $\tau_0 = 5\%$ 时,调节 6 种大气环境条件下可见光波段的平均透过率,使 380~780 nm 可见光波段的大气透过率积分为 5%。此时,能见度定义时的模拟大气光谱透过率 $\tau_0(\lambda)$ 如图 2 所示。

由图 2 可知,大气光谱透过率随可见光波长的变化而变化。在可见光的短波区域,透过率变化平缓,其随着波长的增加呈缓慢增大趋势。在接近红光波段(630~780 nm)时,出现了若干吸收峰,在 710 nm 和 730 nm 波长附近处的光谱透过率最小。大气分子的吸收具有十分明显的选择性,在可见光波段,其主要吸收气体是氧气和水汽^[24]。在 630, 660, 680 nm 波长处,由于氧气对可见光的吸收,故在大气光谱透过率曲线中出现波谷。在 710 nm 和 730 nm 波段处,由于水汽对可见光的吸收,故在大

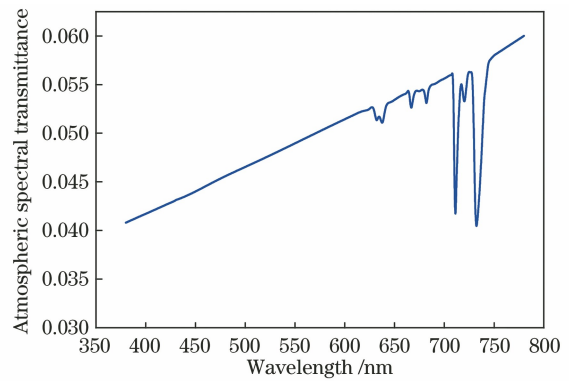


图 2 模拟大气光谱透过率

Fig. 2 Simulated atmospheric spectral transmittance

气光谱透过率曲线中出现波谷。

用光谱模拟误差 p 来评价光谱匹配的质量,它是在 380~780 nm 波段范围内定标光源光谱分布和目标光源光谱分布的差值与目标光源光谱分布比值的最大值,其表达式为

$$p = \max \left[\frac{S(\lambda_i) - S_0(\lambda_i)}{S_0(\lambda_i)} \right] \times 100\%, \quad (9)$$

式中: λ_i 为 380~780 nm 波长范围内的第 i 个波长; $\max(\cdot)$ 为最大值函数。

将 τ_{\max} 和 $\tau_0(\lambda)$ 作为初始条件,利用蒙特卡罗方法,以 2700 K 绝对色温的光谱分布 $S_0(\lambda)$ 为基础,在 380~780 nm 波长范围内,以 1 nm 为光谱间隔,仿真生成 1000 次具有固定光谱模拟误差 p 的随机光谱分布 $S(\lambda)$,使其满足(8)式,此时的特定光谱模拟误差 p 即为所求的 2700 K 绝对色温光谱分布的光谱模拟误差,如图 3 所示。

由图 3 可知:10, 20, 30, 50, 75 m 基线处对应的 2700 K 绝对色温的光谱模拟误差分别为 $\pm 252\%$, $\pm 390\%$, $\pm 452\%$, $\pm 160\%$, $\pm 5.5\%$;透过率精度要求越高,需要的光谱模拟误差越小;10, 20, 30, 50 m 基线光谱模拟误差很大,其对 M_{MOR} 精度的影响可以忽略不计;75 m 基线时光谱模拟误差必须控制在 $-5.5\% \sim 5.5\%$ 范围内。考虑到透射式能见度仪定标应覆盖所有典型基线范围,故将定标光源的光谱模拟误差定为优于 $\pm 5.5\%$ 。

3 透射式能见度仪定标光源系统的组成和工作原理

透射式能见度仪定标光源系统主要由光纤光源、Czerny-Turner 型分光系统、DMD、聚焦透镜、积分球、光谱仪和控制与数据处理系统组成,选用 Czerny-Turner 型分光系统进行色散分光,如图 4 所示。

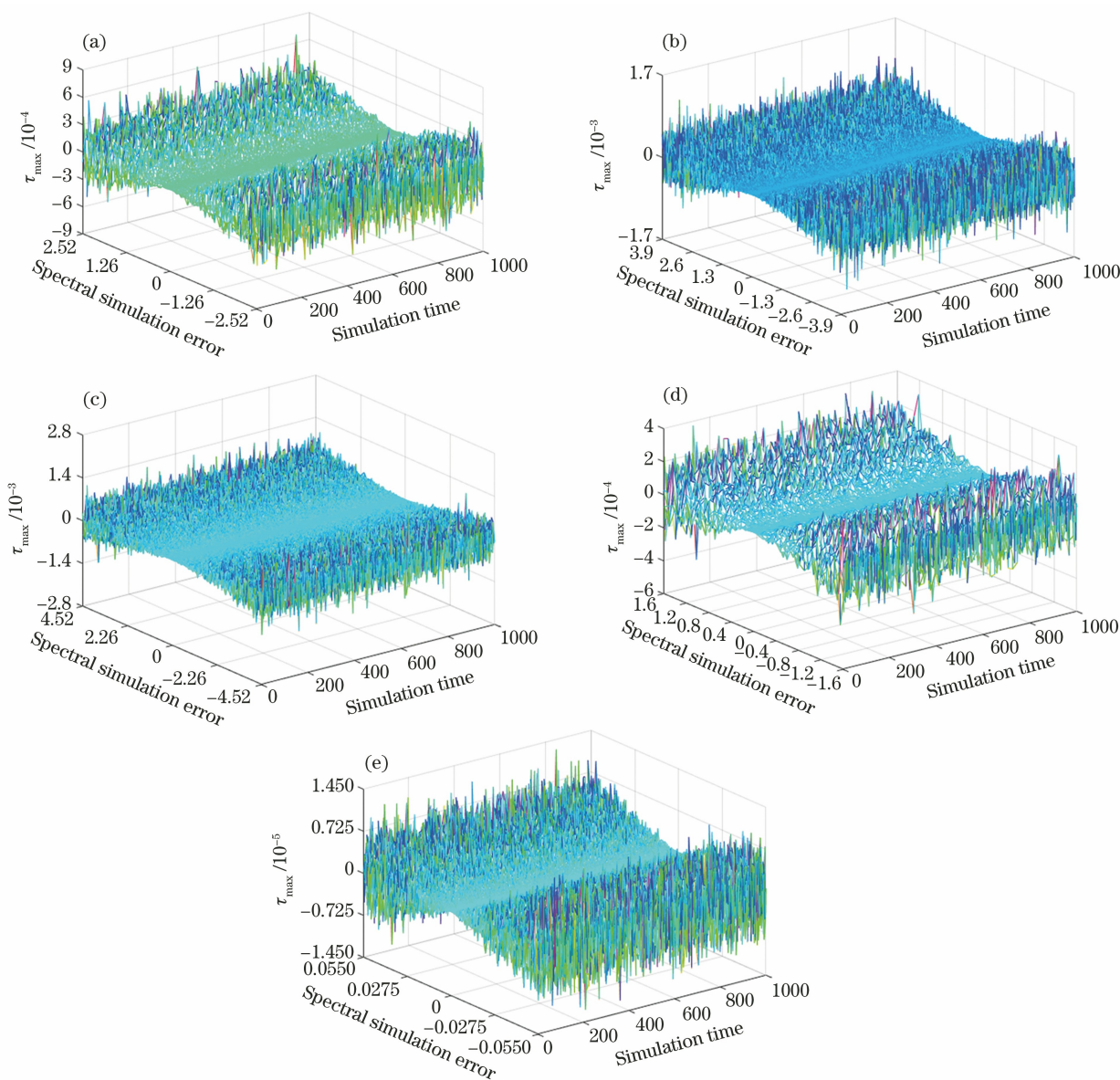


图 3 典型基线长度下 2700 K 绝对色温的光谱模拟误差。(a) 10 m;(b) 20 m;(c) 30 m;(d) 50 m;(e) 75 m

Fig. 3 Spectral simulation errors of absolute color temperature of 2700 K at typical baseline lengths.

(a) 10 m; (b) 20 m; (c) 30 m; (d) 50 m; (e) 75 m

虽然 LED 具有多种光谱种类,但是光源光谱峰值波长间隔较宽,若要实现 2700 K 色温白炽灯光谱的高精度模拟,则需使用数量较多的 LED。同时,由于技术限制,故所选种类不一定满足光源光谱的设计需求,且一旦选定,光谱拟合单元无法更改。在光源选择过程中分析比较卤钨灯和氙灯的特性。卤钨灯光源色温在 3000 K 附近,与 2700 K 接近。氙灯光源具有多峰辐射特性,色温在 6500 K 左右,要高于 2700 K。然而,卤钨灯光源利用灯丝加热发光,灯丝体积大。短弧氙灯相比卤钨灯等其他热光源具有更高的能量集中度^[25-26],更接近于点光源,有利于聚光处理,提升光进入光纤的耦合效率,提高系

统的能量利用率,可以扩大中性密度衰减片透过率的定标范围。因此,选用功率为 8 W 的氙灯光源为 Czerny-Turner 型分光系统的初始光源,它能提供高能量、稳定的光谱辐射,归一化后的氙灯的光谱分布如图 5 所示。

当光纤光源发出的光束入射到狭缝处时,将初始光谱信息导入到 Czerny-Turner 光路结构中,通过调节入射狭缝的宽度可以改变系统的光谱分辨率。准直反射镜提供了一组具有相同入射角、不同波长的准直光束,光栅的作用是将这些准直光束分开。分开后的准直光束经聚焦反射镜成像到 DMD 上形成氙灯连续光谱的衍射谱线,DMD 分辨率

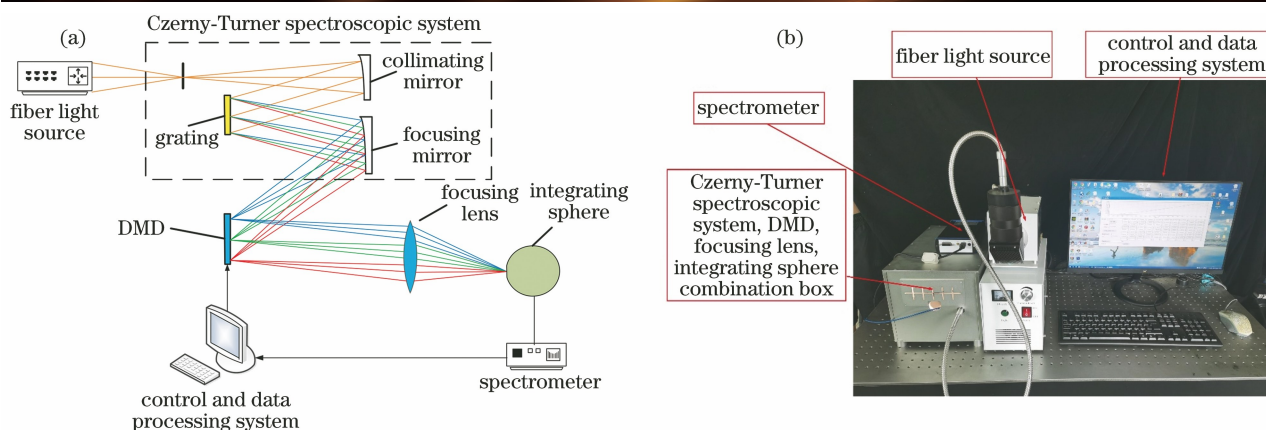


图 4 透射式能见度仪定标光源系统图。(a)系统结构图;(b)系统装置图

Fig. 4 Schematic diagrams of calibration light source system of transmissometer. (a) Structural diagram of system; (b) device diagram of system

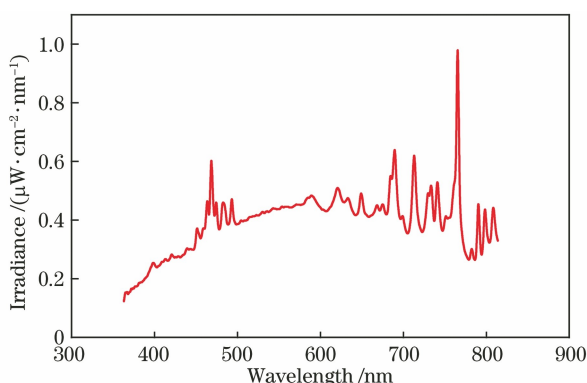


图 5 氙灯的光谱分布

Fig. 5 Spectral distribution of xenon lamp source

为 $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$, 像元尺寸为 $7.56 \mu\text{m}$, 参与光谱调节的 DMD 微镜阵列面为 800 列。通过控制与数据处理系统控制 DMD 光谱拟合单元区间的开关状态以实现 2700 K 绝对色温光谱分布的模拟。DMD 选取后的反射光被聚光透镜会聚至积分球上进行匀光。利用光谱仪监视模拟光谱分布的效果, 并传送至控制与数据处理系统中。

4 2700 K 绝对色温光谱匹配算法

4.1 光谱叠加原理

基于光谱叠加原理^[27], 在拟合单元相互叠加的前提下, 利用光谱分布权重调节后的拟合单元合成目标光谱, 实现目标光谱的匹配。拟合单元合成目标光谱的数学模型为

$$S(\lambda) = \sum K_i S_n(\lambda_i), \quad (10)$$

式中: $S(\lambda)$ 为目标光谱分布; $S_n(\lambda_i)$ 是 DMD 每组阵列对应拟合单元的光谱分布, $i = 1, 2, 3, \dots, n$, n 为光谱拟合单元个数; K_i 为每个拟合单元 $S_n(\lambda_i)$ 的权重系数, 可控制所对应拟合单元的光谱分布。

由(10)式可知, 准确选取光谱拟合单元并精确求解各拟合单元权重系数能够使匹配光谱更贴近目标光谱, 进而实现光谱模拟精度的提高。由于 2700 K 绝对色温光谱曲线平滑, 不存在尖峰, 且光谱拟合单元上的光谱可近似认为是高斯分布, 因此可通过增加光谱拟合单元数量的方式来实现光谱的精确匹配。

4.2 基于无余均分机制的光谱模拟方法

当采用 DMD 光谱调制技术进行光谱模拟时, 可以通过控制 DMD 阵列面开关的控制状态进行拟合单元细分, 从而形成一系列的光谱拟合单元。由于 DMD 由多列微反射镜组成, 故拟合单元细分算法具有多种选择。由于遗传算法拥有实际和高效率的特征, 因此尝试将遗传算法作为定标光源光谱匹配和反馈调节算法。遗传算法是以达尔文的适者生存和优胜劣汰的生物进化论为基础, 模拟生物界的遗传和进化过程而建立的一种优化算法^[28]。

利用遗传算法迭代选择最佳光谱模拟单元数量, 在保证模拟精度的情况下, 提升光谱模拟效率。光谱反馈调整的目的是当光源输出光谱与目标光谱存在差距时, 根据反馈不断调整各组 DMD 微镜阵列的开关状态组合直至得到符合要求的光谱。

由于初始结构划分的光谱拟合单元数量会对光谱模拟效果产生影响, 故若选用固定的光谱拟合单元且拟合单元数量少, 则遗传算法的效率会大大降低。为此, 结合 DMD 具有高分辨率、可以调制更多光谱拟合单元的特点, 提出了一种基于无余均分机制的光谱模拟方法。该方法在遗传算

法基础上,以不断均匀划分 DMD 阵列面的方式增加拟合单元数量,实现了对 2700 K 色温光谱的精确模拟。

遗传算法的适应度函数 E 为

$$E = \int_{380}^{780} [S(\lambda) - S_0(\lambda)]^2 d\lambda, \quad (11)$$

将 $S_0(\lambda)$ 与 $S(\lambda)$ 归一化后比较两者相似性, E 越趋向于 0, 表示光谱匹配越理想。光谱匹配流程如图 6 所示。

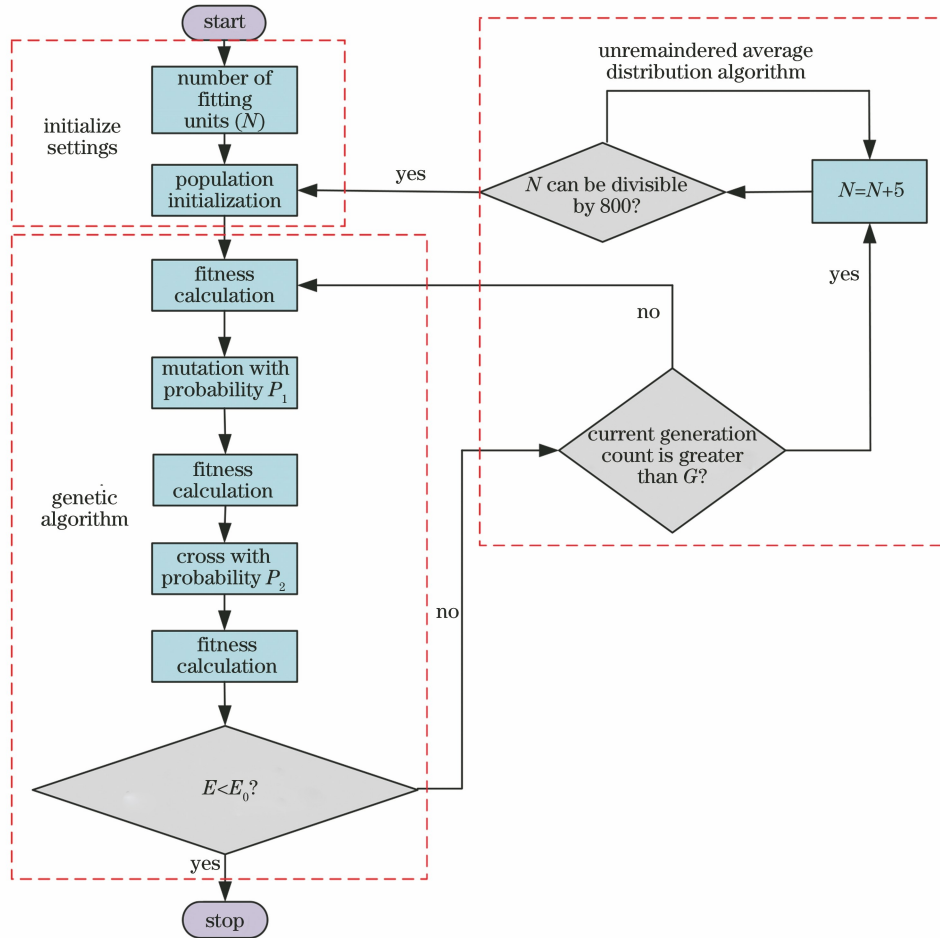


图 6 光谱匹配流程图

Fig. 6 Flow chart of spectral matching

由图 6 可知,光谱匹配流程算法主要分为初始化设置、遗传算法和无余均分算法三部分:

1) 初始化设置

a. 设置拟合单元个数为 N , 进化代数为 G , 样本数为 M , E 的停止阈值为 E_0 。

b. 初始化种群。对每个样本权重系数组合随机生成二进制数组 (k_1, k_2, \dots, k_n) 。 k_i 为一个染色体, 8 位二进制数值, 均分 0 到 1 内的值。

2) 遗传算法

a. 计算适应度。把每个样本权重系数组 (k_1, k_2, \dots, k_n) 和 DMD 阵列面上每组阵列的光谱分布 $S_n(\lambda_i) (i=1, 2, 3, \dots, n)$ 相乘, 得到匹配光谱的光谱分布, 代入适应度函数 E , 比较匹配光谱分布 $S(\lambda)$ 与目标光谱分布 $S_0(\lambda)$ 的相似性。

b. 以 P_1 概率对权重系数 k_i 进行变异运算, 计算变异后的适应度。

c. 以 P_2 概率对权重系数 k_i 进行交叉运算, 计算交叉后的适应度。

d. 若 $E < E_0$, 则找到理想的匹配方式, 记录各个拟合单元光谱分布与最小 E 对应的权重系数组 (k_1, k_2, \dots, k_n) ; 若 $E \geq E_0$, 则未找到匹配结果, 进入无余均分算法部分。

3) 无余均分算法

a. 若迭代次数未超过最大代数 G , 则重新进入遗传算法部分。

b. 若迭代次数超过最大代数 G , 根据 $N = N + 1$, 逐一增加拟合单元个数, 直至满足 DMD 阵列组数整除参与光谱调节的 800 列微镜数, 重新初始化

种群,优化权重系数。

5 透射式能见度仪定标光源系统的性能测试结果及测量不确定度分析

5.1 绝对色温光谱模拟的初始设置

2700 K 绝对色温光谱模拟的初始设置包括导入光谱拟合单元、初始化设置以及实时监控三部分。首先,导入光谱拟合单元的光谱分布曲线。然后,对软件进行初始化设置,主要包含黑体比例系数和每

个微小波段 $S(\lambda_i)$ 单元的比例系数 K_i 。调节黑体比例使实际采集的 DMD 微镜阵列面上的辐照度与 2700 K 绝对色温的辐照度量级匹配,读入遗传算法计算后的 K_i 可得到不同光谱拟合单元对应的 2700 K 绝对色温的光谱模拟误差。最后,实时监控光源的光谱分布。图 7 为透射式能见度仪定标光源系统光谱模拟的软件界面,图中显示的是 50 个光谱基础模拟单元,绝对色温为 2700 K 时的光谱拟合效果。

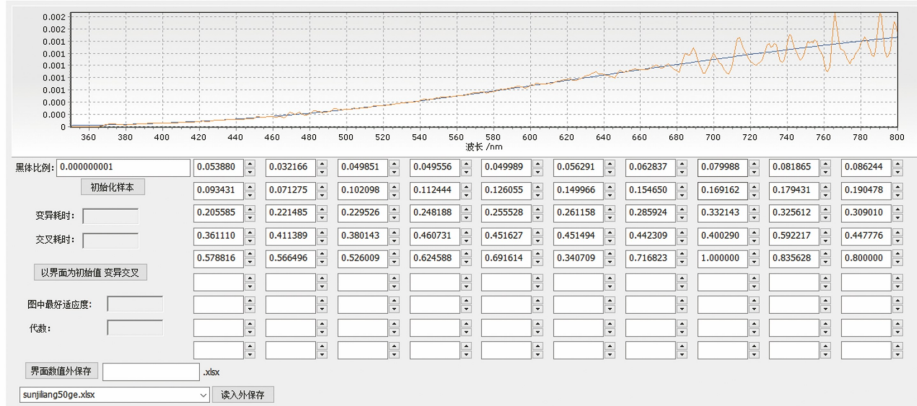


图 7 透射式能见度仪定标光源系统光谱模拟软件

Fig. 7 Spectral simulation software for calibration light source system of transmissometer

5.2 测试结果

以均分 800 列 DMD 微镜阵列面为前提,得到了 10, 20, 40, 50, 80 个等一系列的光谱基础拟合单元。对 20, 50, 80 个基础模拟单元处, 2700 K 绝对色温的光谱模拟误差进行分析, 光谱分辨率为 1 nm。当光谱基础模拟单元个数为 20 时, 光谱测试结果如图 8 所示。可以发现, 光谱模拟误差仅优

于 $\pm 28\%$, 远远达不到 $\pm 5.5\%$ 的指标要求。当光谱基础模拟单元个数为 50 时, 光谱测试结果如图 9 所示, 光谱模拟精度提高到了优于 $\pm 14\%$, 但还是达不到 $\pm 5.5\%$ 。当光谱基础模拟单元个数为 80 时, 光谱测试结果如图 10 所示, 光谱模拟精度为 $\pm 5.3\%$, 达到了 $\pm 5.5\%$ 的技术指标要求。因此, 可以通过增加光谱拟合单元数量提高光谱模拟精度。

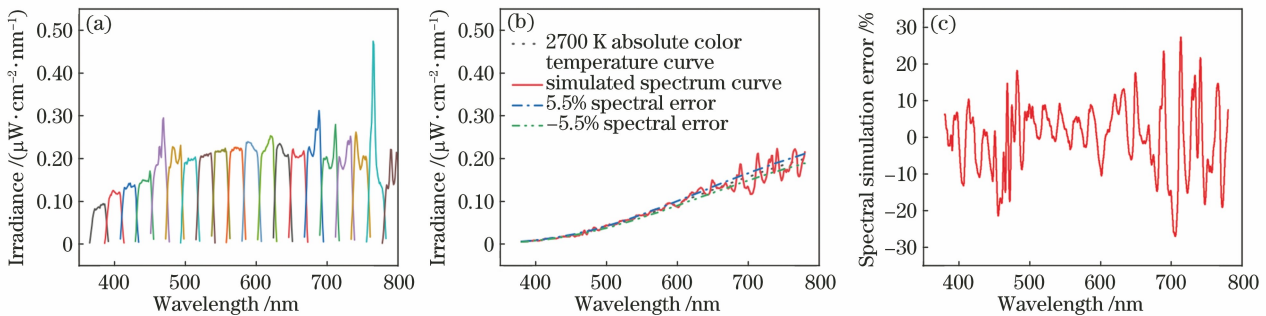


图 8 20 个光谱模拟单元测试结果。(a) 20 个基础拟合单元光谱分布; (b) 2700 K 绝对色温光谱模拟效果; (c) 光谱模拟误差
Fig. 8 Test results of 20 spectral simulation units. (a) Spectral distribution of 20 basic fitting units; (b) simulation effect of spectrum with absolute color temperature of 2700 K; (c) spectral simulation error

5.3 不确定度分析

综合考虑相对光谱分布测量原理以及实验过程, 对透射式能见度仪定标光源的光谱模拟测量不确定度来源进行了分析, 其组成部分如下:

- 1) 氙灯量值溯源引入的不确定度 u_1 。
- 2) 积分球出光口辐射面上辐照度测量引入的不确定度 u_2 。
- 3) 光谱调制时光谱漂移引入的不确定度 u_3 。

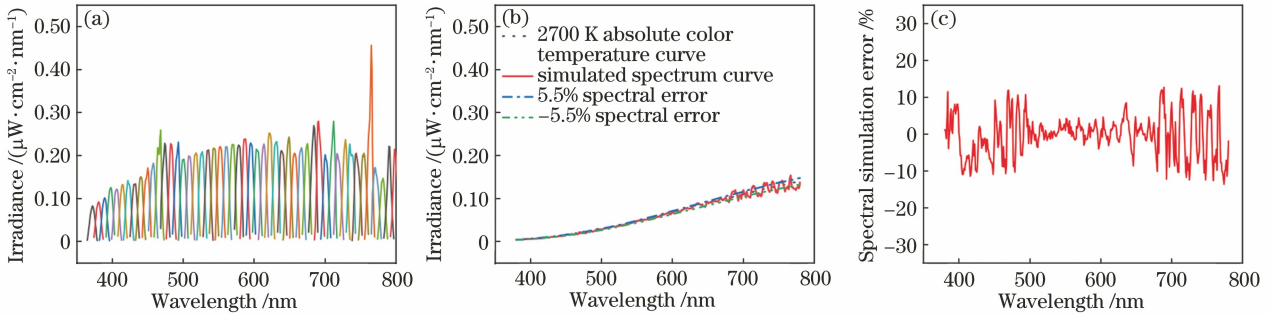


图 9 50 个光谱模拟单元测试结果。(a) 50 个基础拟合单元光谱分布;(b) 2700 K 绝对色温光谱模拟效果;(c) 光谱模拟误差
Fig. 9 Test results of 50 spectral simulation units. (a) Spectral distribution of 50 basic fitting units; (b) simulation effect of spectrum with absolute color temperature of 2700 K; (c) spectral simulation error

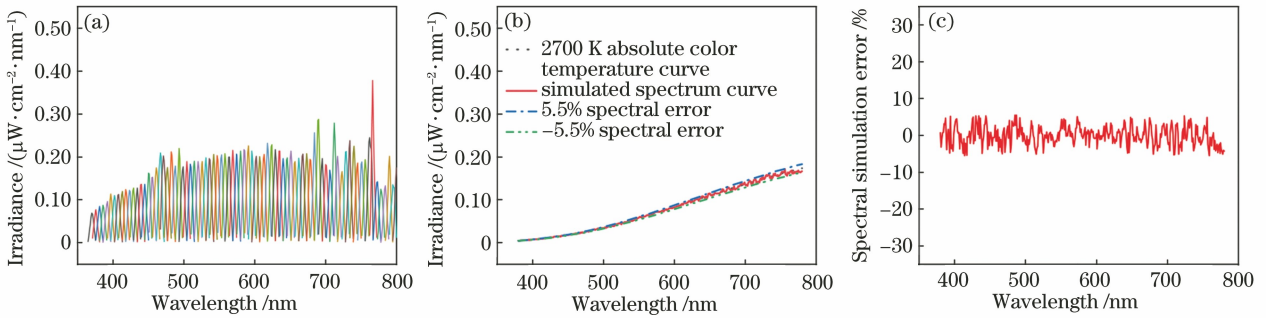


图 10 80 个光谱模拟单元测试结果。(a) 80 个基础拟合单元光谱分布;(b) 2700 K 绝对色温光谱模拟效果;(c) 光谱模拟误差
Fig. 10 Test results of 80 spectral simulation units. (a) Spectral distribution of 80 basic fitting units; (b) simulation effect of spectrum with absolute color temperature of 2700 K; (c) spectral simulation error

4) 光谱仪波长示值误差引入的不确定度 u_4 。

5) 实验室内大气扰动、杂散光干扰和背景辐射等引入的不确定度 u_5 。

根据以上不确定度来源,对各不确定度分量进行了如下分析:

1) 氙灯量值溯源引入的不确定度

使用的氙灯光源已经溯源到中国计量科学研究院的标准光源,氙灯量值溯源引入的不确定度由氙灯的检定证书给出,按 B 类不确定度评定, $u_1 = \frac{1.60\%}{2} = 0.80\%$, 包含因子为 $k=2$ 。

2) 辐照度测量引入的不确定度

使用经中国计量科学研院校准后的辐照计测量辐照度,按 A 类不确定度评定,辐照度测量引入的不确定度计算公式为

$$u_2 = \frac{S(E_i)}{\sqrt{n}}, \quad (12)$$

式中: u_2 为光源辐照度测量不确定度; E_i 为第 i 次测得的辐照度值; n 为测量次数; $S(E_i)$ 为辐照度测量标准偏差。此处, $u_2 = 0.27\%$ 。

3) 光谱漂移引入的不确定度

使用 AvaSolar 光谱仪测试光谱调制时的光谱

漂移,选择 380,480,580,680,780 nm 波长完成测量,按 A 类不确定度评定。光谱波长漂移引入的不确定度的计算公式为

$$S_x(\lambda) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i - \bar{\lambda})^2}{n-1}}, \quad (13)$$

$$u_3 = \frac{s(\lambda)}{\sqrt{n}}, \quad (14)$$

式中: λ_i 为光谱波长第 i 次测量数据; $\bar{\lambda}$ 为波长测量数据的算术平均值; $S_x(\lambda)$ 为测得光谱波长的标准偏差; u_3 为光谱波长漂移的不确定度。每个光谱测量 20 次,以 380 nm 波长处最大不确定度 0.032% 作为光谱漂移引起的不确定度分量,即 $u_3 = 0.032\%$ 。

4) 光谱仪波长示值误差引入的不确定度

根据 AvaSolar 光谱仪波长示值误差的检定证书,按 B 类不确定度评定,则光谱仪波长示值误差引入的不确定度为 $u_4 = \frac{3.00\%}{2} = 1.50\%$, $k=2$ 。

5) 实验室内大气扰动、杂散光干扰、背景辐射等引入的不确定度

按 B 类不确定度评定, u_5 为 1.00%。

以上得到的各分量互不相关,合成相对标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} = 2.02\% \quad (15)$$

表 2 光谱分布测量不确定度($k=2$)

Table 2 Uncertainty of spectral distribution measurement ($k=2$)

Source	Uncertainty / %
Traceability of value of xenon lamp	0.80
Measurement of light source irradiance	0.27
Spectral drift	0.032
Wavelength indication error of AvaSolar spectrometer	1.50
Atmospheric disturbance, stray light interference, background radiation	1.00
Composite uncertainty	2.02
Extended uncertainty	4.04

6 结 论

针对如何实现 MOR 定义中 2700 K 绝对色温白炽灯光谱分布的精确模拟,对透射式能见度仪定标光源系统的光谱模拟方法进行了研究。理论分析了光谱不匹配对透射式能见度仪校准带来的影响,建立了满足透射式能见度仪定标精度要求的光源光谱分布判别依据。用蒙特卡罗方法得出了透射式能见度仪在典型基线长度为 10, 20, 30, 50, 75 m 处对应的 2700 K 绝对色温的光谱模拟误差分别为 $\pm 252\%$, $\pm 390\%$, $\pm 452\%$, $\pm 160\%$, $\pm 5.5\%$ 。考虑到透射式能见度仪的校准应覆盖所有典型基线范围,故定标光源的光谱模拟误差应优于 $\pm 5.5\%$ 。在遗传算法基础上,提出了一种基于无余均分机制的光谱模拟方法,以均分 800 列 DMD 微镜阵列面为前提,通过不断均匀划分 DMD 阵列面的方式增加光谱拟合单元数量,得到了 10, 20, 40, 50, 80 个等一系列的光谱基础拟合单元。对 20, 50, 80 个基础光谱拟合单元情况下 2700 K 绝对色温的光谱模拟误差及测量不确定度进行分析。结果表明,20, 50, 80 个基础光谱拟合单元的光谱模拟误差分别为 $\pm 28\%$, $\pm 14\%$, $\pm 5.3\%$, 扩展不确定度为 4.04%。其中,80 个基础光谱拟合单元的光谱模拟误差达到了定标光源的光谱模拟精度,在一定程度上减小了光谱不匹配对透射式能见度仪定标精度的影响,实现了对 2700 K 色温白炽灯光谱的精确模拟。所提透射式能见度仪定标光源光谱分布判别依据和光谱模拟方法,可为建立透射式能见度仪校准体系提供

取包含因子 $k=2$, 扩展不确定度 $U=ku_c=4.04\%$ 。透射式能见度仪定标光源的光谱分布测量不确定度如表 2 所示。

理论基础及技术支持。

参 考 文 献

- [1] World Meteorological Organization. Guide to meteorological instruments and methods of observation[R]. Geneva: WMO, 2014: 291.
- [2] Lu C, Liu W Q, Wang Y F, et al. Simulation and analysis of sky background radiance in slant visibility calculation[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(14): 1401001.
陆川, 刘文清, 王玉峰, 等. 斜程能见度计算中的天空背景辐射亮度仿真与分析[J]. 光学学报, 2020, 40(14): 1401001.
- [3] Liang J, Zhang G Y, Zhang J, et al. Calibration method for attenuator piece used in calibrating a transmittance visibility meter [J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(23): 8614-8618.
- [4] Tai H D. Key technology research on test and evaluation of visibility meters[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020: 15-16.
台宏达. 能见度仪测试评价关键技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020: 15-16.
- [5] Griggs D J, Jones D W, Ouldrige M, et al. WMO instrument and observing methods report No. 41 (TD401): the first WMO inter-comparison of visibility measurement: final report [R]. Geneva: WMO, 1990.
- [6] Bloemink H I. KNMI visibility standard for calibration of scatterometers [EB/OL]. [2021-01-02]. [https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo-td-1354_en/P3\(26\)_Bloemink-Ms_Netherlands.pdf](https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo-td-1354_en/P3(26)_Bloemink-Ms_Netherlands.pdf).
- [7] Zhang J, Zhang G Y, Sun G F, et al. Alignment

- technology for standard scatter plate calibration system used in calibrating forward scattering visibility meter[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1207-1215.
- 张健, 张国玉, 孙高飞, 等. 校准能见度仪用标准散射体定标系统装调技术[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(5): 1207-1215.
- [8] Zhang J, Zhang G Y, Zhang J L, et al. Optical system error analysis for standard scattering plate calibration system used in calibration visibility meter [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(2): 0229002.
- 张健, 张国玉, 张建良, 等. 用于校准能见度仪的标准散射体定标系统中光学系统的误差分析[J]. 光子学报, 2017, 46(2): 0229002.
- [9] Huang C D, Li W, Liu R L, et al. Research on calibration methods of transmission visibility meter [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2018, 35(1): 17-19.
- 黄成栋, 李玮, 刘瑞良, 等. 透射式能见度仪校准方法研究[J]. 气象水文海洋仪器, 2018, 35(1): 17-19.
- [10] Park S, Lee D H, Kim Y G. SI-traceable calibration of a transmissometer for meteorological optical range (MOR) observation [J]. Korean Journal of Optics and Photonics, 2015, 26(2): 73-82.
- [11] Fryc I, Brown S W, Ohno Y. Spectral matching with an LED-based spectrally tunable light source [J]. Proceedings of SPIE, 2005, 5941: 594111.
- [12] Burgos F J, Vilaseca M, Perales E, et al. Spectral LED-based tuneable light source for the reconstruction of CIE standard illuminants [M]// Elmoataz A, Lezoray O, Nouboud F, et al. Image and signal processing. Lecture notes in computer science. Cham: Springer, 2014, 8509: 115-123.
- [13] Xu D, Zhang G Y, Sun G F. Design of advanced Offner-type convex grating spectral radiation calibration optical system [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 0822002.
- 徐达, 张国玉, 孙高飞. 改进 Offner 型凸面光栅光谱辐射定标光学系统设计[J]. 光学学报, 2020, 40(8): 0822002.
- [14] Xu G Q, Zhang J H, Cao G Y, et al. Solar spectrum matching using monochromatic LEDs [J]. Lighting Research & Technology, 2017, 49(4): 497-507.
- [15] Chong W, Bian Z Q, Chu J H, et al. A method for calibrating forward scatter meters indoors [J]. Metrologia, 2020, 57(6): 065030.
- [16] Tai H D, Zhuang Z B, Sun D S. Development and accuracy of a multipoint method for measuring visibility[J]. Applied Optics, 2017, 56(28): 7952-7959.
- [17] Tai H D, Zhuang Z B, Jiang L H, et al. Multi-point mobile measurement of atmospheric transmittance [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(8): 1894-1901.
- 台宏达, 庄子波, 蒋立辉, 等. 大气透过率的多点移动测量[J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 1894-1901.
- [18] International Civil Aviation Organization. Annex 3 to the convention on international civil aviation: meteorological services for international air navigation [R]. Montreal: ICAO, 2007: ATT A-1.
- [19] Zhejiang Provincial Market Supervision Administration. Calibration specification for the forward-scattering visibility meter: JJF 1154—2019 [S]. 2019-01-14.
- 浙江省市场监督管理局. 前向散射能见度仪校准规范: JJF 1154—2019[S]. 2019-01-14.
- [20] Arnulf A, Bricard J, Curé E, et al. Transmission by haze and fog in the spectral region 0.35 to 10 microns [J]. Journal of the Optical Society of America, 1957, 47(6): 491-498.
- [21] Xu D S, Wang Y Z. Describing relationship of three basic laws of blackbody radiation based on graph [J]. Physics and Engineering, 2012, 22(5): 8-11.
- 徐代升, 王元樟. 基于图形的黑体辐射三大基本定律关系阐述[J]. 物理与工程, 2012, 22(5): 8-11.
- [22] Wang X W, Zhou Z H, Bai J, et al. Research on the influence of atmospheric environment on the transmission characteristics of visible light [C]//2007 Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society, November 22-25, 2007, Guangzhou, China. [S.l.: s.n.], 2007: 158-166.
- [23] Zhang M. Design and implementation of the model in atmospheric radiative transmission characteristics for typical weather [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2015: 13-16.
- 张敏. 典型天气大气辐射传输特性模型设计与实现 [D]. 大连: 大连海事大学, 2015: 13-16.
- [24] Lian W H, Wang Y J, Yang X L, et al. Design of light waves atmospheric transmittance model based on MODTRAN [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(12): 1531-1535.
- 连文浩, 王永杰, 杨小龙, 等. 基于 MODTRAN 的光波大气透射率模型设计[J]. 激光与红外, 2016, 46(12): 1531-1535.
- [25] Su S, Meng F L, Zhang G Y, et al. Design method of irradiance attenuator for solar simulator of xenon lamp [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0208001.
- 苏拾, 孟凡琳, 张国玉, 等. 氙灯光源太阳模拟器辐照衰减器设计方法[J]. 光学学报, 2021, 41(2):

0208001.

- [26] Chen Y Y, Fang X D, Guo L, et al. Design of a solar radiation simulator for the aircraft cabin thermal load tests[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(9): 0922001. 陈圆圆, 方贤德, 郭龙, 等. 座舱热载荷太阳辐射模拟器设计研究 [J]. *光学学报*, 2020, 40 (9): 0922001.
- [27] Zhang J, Sun J L, Zhang G Y, et al. Research on 2700 K blackbody color temperature spectral simulation method for calibrating visibility meter[J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2020, 37(4): 8-10, 15. 张健, 孙继亮, 张国玉, 等. 校准能见度仪用 2700 K 黑体色温光谱模拟方法研究 [J]. *气象水文海洋仪器*, 2020, 37(4): 8-10, 15.
- [28] Liu H X, Ren J W, Liu Z X, et al. LED-based single star simulator with multi-color-temperature and multi-star-magnitude output[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0212003. 刘洪兴, 任建伟, 刘则洵, 等. 基于 LED 的多色温多星等单星模拟器 [J]. *光学学报*, 2015, 35 (2): 0212003.