

## 可溯源至 MOR 定义的标准散射体定标方法

牛政杰<sup>1</sup>, 张健<sup>1,2,3\*</sup>, 张玉<sup>1,2,3</sup>, 邹阳阳<sup>4</sup>, 段宗涛<sup>1</sup>, 赵斌<sup>1</sup>, 杨俊杰<sup>1</sup>, 任太阳<sup>1</sup>, 莫晓旭<sup>1</sup>, 张建良<sup>5</sup><sup>1</sup>长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;<sup>2</sup>吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 吉林 长春 130022;<sup>3</sup>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;<sup>4</sup>吉林大学仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130012;<sup>5</sup>空军航空大学飞行训练基地第二训练团, 吉林 长春 130022

**摘要** 针对目前标准散射体定标存在定标时间长、定标后通用性差、定标结果无法溯源到气象光学视程(MOR)定义等问题,提出了一种可溯源至 MOR 定义的标准散射体定标方法,确定了一种标准散射体多角度同步定标光学系统架构,优化设计了照明光学系统与光场测量光学系统。照明光学系统的均匀性为 98.53%,发散角为 1.48°;光场测量光学系统的散射角度测量范围为 20°~50°,散射角度分辨率为 1°,周视角度分辨率为 2°。研究了一种基于先验光场分布的定标系统能量校准方法,利用标准朗伯散射体仿真定标系统的能量校准误差,其中散射角度为 31°时周视平均相对误差最大,为 2.28%。据此,基于理想 2700 K 色温白炽灯的光谱分布仿真验证了可溯源至 MOR 定义的标准散射体定标方法的定标精度。结果表明:标准朗伯散射体散射角度 20°~50°所表征的 MOR 量值范围为 6.54~45.74 m,符合世界气象组织对 MOR 的定义,最大绝对误差为 -2.41 m,优于国际民航组织规定的前向散射仪测量精度要求的 1/10,为可溯源至 MOR 定义的标准散射体定标提供理论基础和技术支持。

**关键词** 测量; 气象光学视程; 标准散射体; 散射光场; 定标精度; 能量校准误差

中图分类号 TH765.8+3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221353

## 1 引言

能见度作为气象观测的基本要素,是表征近地表大气透明程度和污染程度的重要物理量,在交通安全预警、生态环境保护、气候变化与大气污染监测、小微尺度极端天气预报与气象灾害预警中有着重要应用<sup>[1]</sup>。鉴于能见度定义具有主观性且受诸多物理量因素以及人工观测不稳定性的影响,世界气象组织(WMO)规定利用气象光学视程<sup>[1]</sup>(MOR)即“2700 K 色温白炽灯发出的平行光束,其光通量经过大气削弱降低到初始值的 5% 时所通过的路径长度”来表征仪器测得的能见度。前向散射仪作为大气环境监测中不可或缺的能见度地基观测仪器,自诞生以来,因技术发展瓶颈与自身工作原理限制,始终无法实现符合 MOR 定义的观测量值溯源和外场校准。为此国内外提出了多种前向散射仪的观测量值溯源和外场校准方法。

从 1989 年 WMO 开展第一次大规模人工观测视程与各类仪器观测 MOR 比对试验<sup>[2]</sup>,到 1998 年中国人民解放军空军司令部气象局组织的大气透射仪与前

向散射仪比对试验,再到 2018 年韩国庆州大学进行的基于图像观测视程的能见度观测方法与大气透射仪以及人工观测比对试验<sup>[3]</sup>,大气透射仪因测量原理与 MOR 定义最为接近,测量一致性好,低能见度情况下测量准确度高,成为目前 WMO 和国际民航组织(ICAO)推荐的前向散射仪比对校准方法中的标准仪器。但是该方法需要持续稳定的各类能见度观测环境,受天气条件制约严重,同时大气透射仪对于安装的稳定性和准确性要求较高,安装使用后不宜移动,致使大气透射仪比对法目前只能用于前向散射仪的出厂校准,无法满足前向散射仪工作现场的外场校准需求。为此,2001 年中国人民解放军空军第七研究所提出了一种利用标定后的前向散射仪制作多块标准模板的前向散射仪外场校准设想<sup>[4]</sup>,可惜并未具体实施。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、中性密度滤光片和标准散射体的前向散射式能见度仪校准方法。利用 Vaisala 公司 FD12P 前向散射式能见度仪(工作波长 875 nm,散射角度 30°)和 Mitras 透射式能见度仪进行了为期一

收稿日期: 2022-10-21; 修回日期: 2022-12-20; 录用日期: 2023-01-06; 网络首发日期: 2023-01-15

基金项目: 吉林省科技发展计划项目(20200401046GX)、国家自然科学基金重大项目(61890960)、长春理工大学科技创新基金(XJLJG-2018-02)

通信作者: \*zhangjian\_nr@126.com

年的连续外场比对。该方法虽然可将前向散射式能见度仪观测结果溯源到室内对中性密度滤光片透过率的定标精度,但是校准方法复杂,误差传递环节多,校准过程仍然依赖透射式能见度仪和前向散射能见度仪的外场比对试验,需要 6 个月甚至更长时间才有可能获得较好的校准结果,且观测得到的可供分析的有效数据非常少,定标后的散射体只能用于特定型号的前向散射能见度仪的外场校准<sup>[5]</sup>。2008 年中国科学院安徽光学精密机械研究所利用标准透射式能见度仪确定前向散射能见度仪的传递系数的基础上,提出利用两块具有相同透射系数的漫透射板校准前向散射能见度仪的方法,在保证测量准确性的同时,为前向散射能见度仪结构改变以及更换后的校准带来极大的方便<sup>[6]</sup>。2015 年韩国标准与科学研究所(KRISS)提出了一种可溯源到国际单位制的 75 m 基线透射式能见度仪的室内校准方法,设计了一种利用白光发光二极管(LED,相关色温为 5500 K)、具有 CIE1924 人眼视觉函数光谱响应探测器以及中性密度滤光片的定标仪器,将透射式能见度仪观测结果溯源到 KRISS 对中性密度滤光片光谱透过率的定标结果,进一步补充了透射式能见度仪的校准体系,完善了前向散射能见度仪观测量值的传递链条<sup>[7]</sup>。为了避免天气条件对前向散射仪比对校准的影响,2017 年中国民航大学和 2020 年中国气象局先后建立用于大气前向散射仪

定标的室内大气环境模拟装置<sup>[8-9]</sup>,利用该装置定标后的大气前散仪可以作为标准散射体定标的基准仪器。2017 年,长春理工大学以无需经大气透射仪比对的定标标准散射体定标为目标,设计了一种标准散射体室内定标光学系统,并分析了光学系统误差对定标精度的影响<sup>[10-11]</sup>,但并未进行溯源到 MOR 定义的相关研究。

针对目前标准散射体定标存在定标时间长、定标后通用性差、定标结果无法溯源到 MOR 定义等问题,本文提出了一种可溯源至 MOR 定义的标准散射体定标方法,设计了一种由均匀照明光学系统和光场测量光学系统组成的标准散射体定标系统,实现了标准散射体多散射角度同步标定,解决了标准散射体的标定方法无法溯源到 MOR 定义的难题,为完善能见度量值传递与溯源体系提供技术基础。

## 2 可溯源至 MOR 定义的标准散射体定标方法

### 2.1 符合 MOR 定义的标准散射体定标原理

根据前向散射仪工作原理可知<sup>[12]</sup>,标准散射体利用已知的自身某一角度的散射特性,实现对相应能见度量值的表征,从而代替前向散射仪工作区域中的大气散射特性,实现对前向散射仪的校准。标准散射体校准前向散射仪原理如图 1 所示。

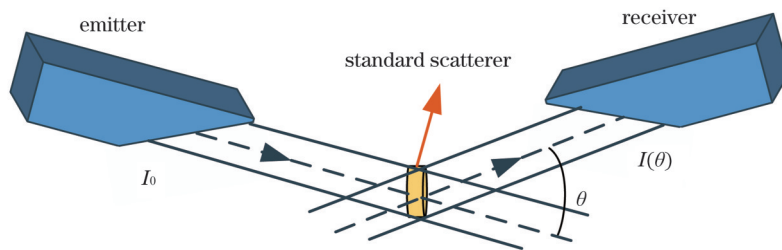


图 1 标准散射体校准前向散射仪原理

Fig. 1 Principle of standard scatterer calibrating forward scatterometer

根据图 1 可知,标准散射体的定标过程实际可以看作对其特征角度散射特性的评定。因此,标准散射体的定标模型可在双向透射分布函数<sup>[13]</sup>模型上退化为垂直入射的双向透射分布函数模型,如图 2 所示。

根据图 2 可知,若入射光束的色温和平行度符合 MOR 定义,此时  $I_0$  记作  $I_{MOR}$ ,则只需测得标准散射体在散射角  $\theta$  方向的散射光强  $I_\theta$  与入射光强  $I_{MOR}$  的比值,即可完成对标准散射体在散射角  $\theta$  方向所模拟能见度的定标。

根据前向散射仪测量原理<sup>[14]</sup>,符合 MOR 定义的标准散射体定标原理如下式所示:

$$M = \frac{\ln \epsilon}{\ln \frac{I_\theta}{I_{MOR}}}, \quad (1)$$

式中:  $M$  为标准散射体所表征的 MOR;  $\epsilon$  是人眼的视

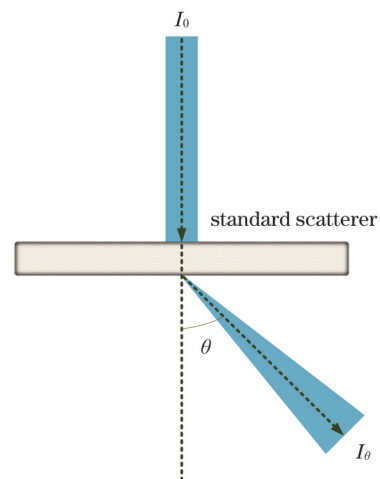


图 2 标准散射体定标模型

Fig. 2 Calibration model of standard scatterer

觉阈值,根据 WMO 和 ICAO 规定,通常为  $0.05^{[15]}$ ;  $I_{MOR}$  为符合 MOR 定义的人射光垂直照射到标准散射体的光强;  $\theta$  为标准散射体所匹配的需校准前向散射仪的工作散射角度;  $I_{\theta}$  是角度为  $\theta$  方向的散射光强度。

## 2.2 标准散射体定标系统组成与工作原理

标准散射体定标系统主要由照明光学系统与光场

测量光学系统组成,其中照明光学系统由光源、整形透镜、双排复眼透镜、准直透镜组组成,保证入射光束可以符合 MOR 定义;光场测量光学系统由标准散射体、半球穹顶、非球面反射镜、全景成像系统和电荷耦合器件 (CCD) 相机组成,用于实现对多个散射角度的散射光强的测量。系统的组成框图和工作原理如图 3 和图 4 所示。

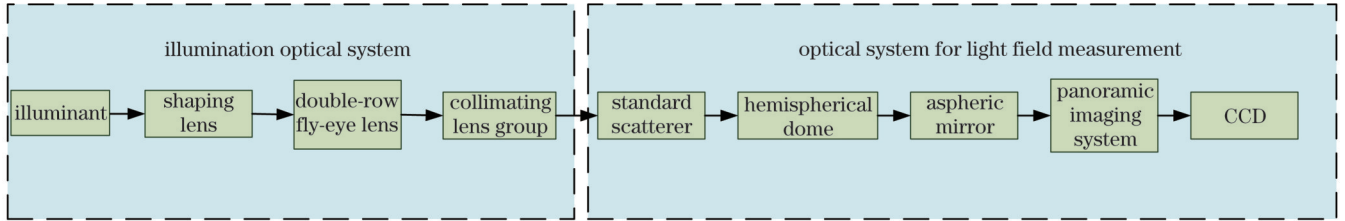


图 3 标准散射体定标系统组成框图

Fig. 3 Composition of standard scatterer calibration system

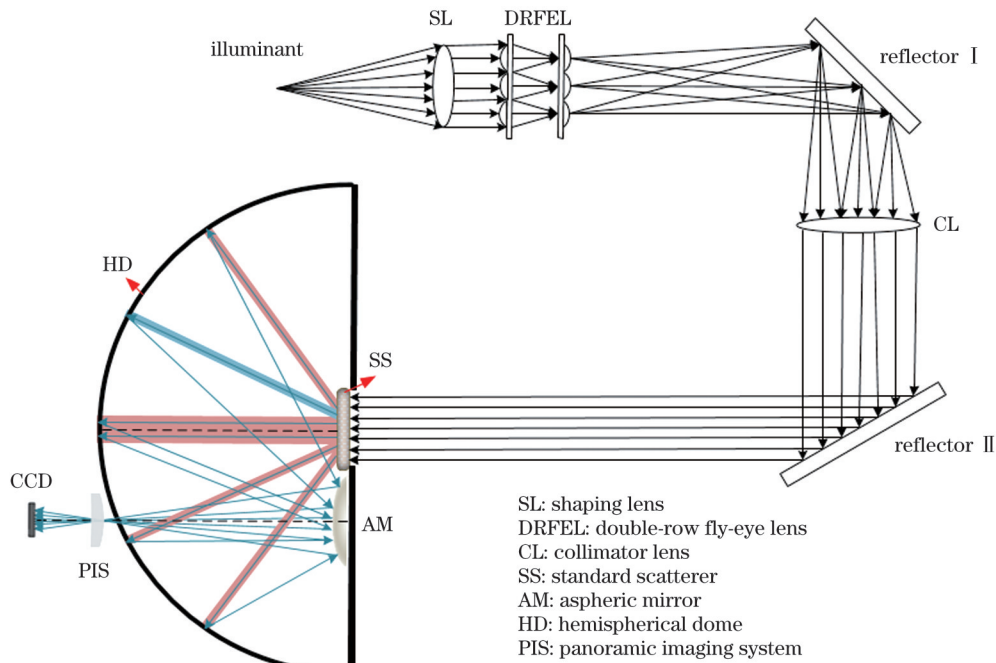


图 4 定标系统工作原理

Fig. 4 Working principle of calibration system

如图 4 所示,照明光学系统中满足 MOR 定义的光源发出的光束经过整形透镜后,以近似平行光的入射条件进入双排复眼透镜,经由双排复眼透镜对光束进行匀光,匀光后的光束经反射镜 I 折转光路进入准直透镜,提高出射光束的平行度,再经反射镜 II 折转光路,光束垂直照射到需定标的标准散射体,在半球穹顶内壁形成标准散射体的散射光场分布。半球穹顶内壁(涂有漫反射材料)将接收到的散射光反射到非球面反射镜面上,进而进入全景成像系统,在 CCD 上获得入射光束经标准散射体散射后的光强分布信息。最终根据照明光学系统发出的光束强度,由式 (1) 可以得到符合 MOR 定义的标准散射体定标

结果。

## 3 标准散射体定标系统设计

### 3.1 照明光学系统设计

根据 MOR 定义和标准散射体定标系统工作原理,同时考虑到标准散射体具有一定尺寸<sup>[16]</sup>,可知照明光学系统主要需从光源的光谱分布、光束发散角度和照明均匀性三方面进行考量。其中,2700 K 色温白炽灯的光谱分布由光源自身特性决定;照明光学系统满足发散角小于  $1.59^\circ$ ,即可满足 MOR 定义<sup>[17]</sup>。同时,根据标准散射体定标模型可知,照明光学系统的均匀性会对入射光束  $I_{MOR}$  的量值带来影

响,导致标准散射体所表征的 MOR 定标结果不准确。因此,为了兼顾辐照均匀性和出射光束角度,照明光学系统采用复眼透镜搭配准直透镜组的均匀照明形式。

为了避免照明光学系统发生旁瓣效应<sup>[18]</sup>,并保证

光学系统的可加工性<sup>[19]</sup>,整形透镜和准直透镜组应配合双排复眼透镜的相对孔径进行设计。本文设计的双排复眼透镜数目为 64,相对孔径为 1/4。优化设计后的照明光学系统光路、辐照面照度分布以及出射光线角度如图 5 所示。

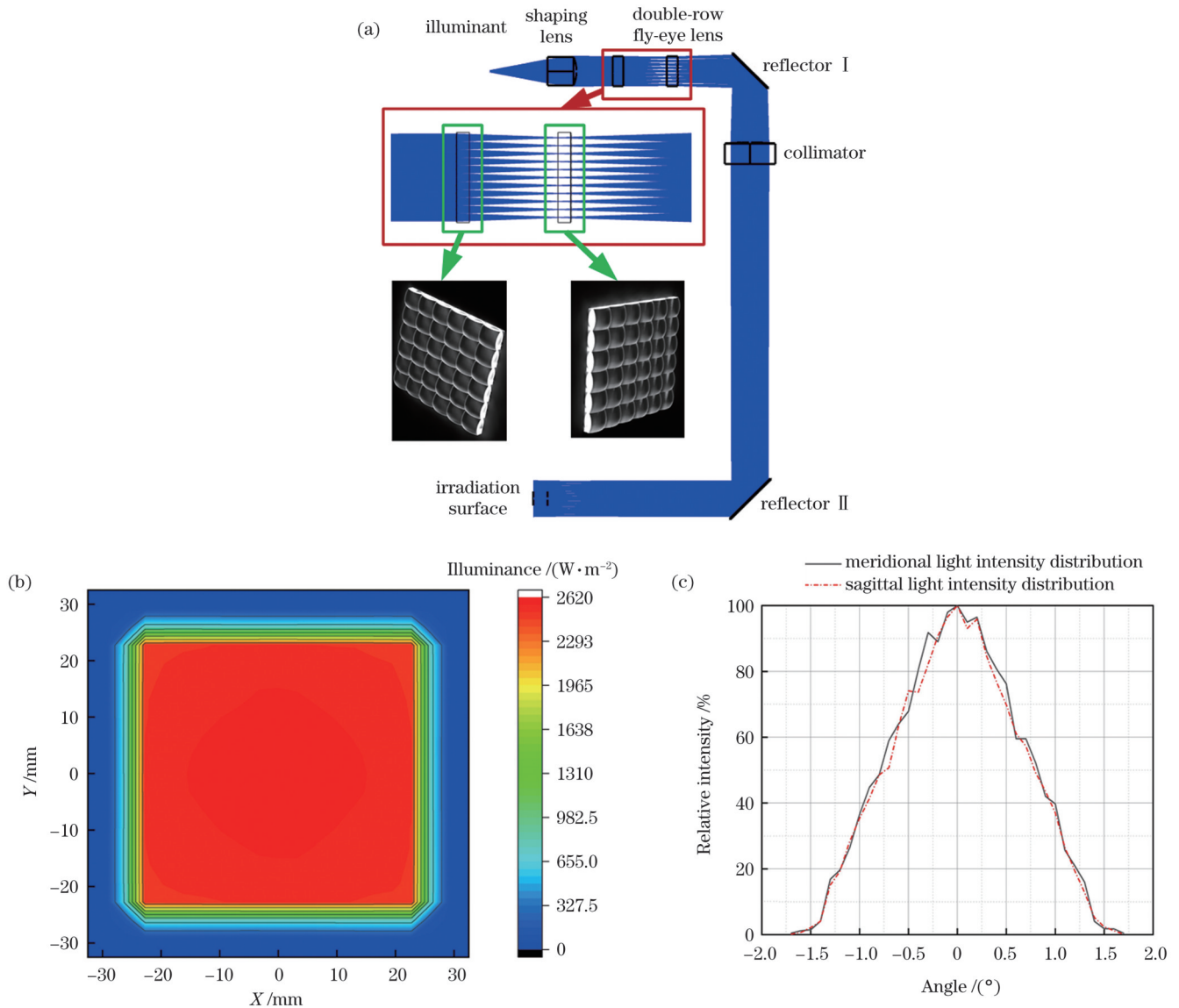


图 5 照明光学系统设计结果。(a)优化设计后的照明光学系统光路;(b)辐照面照度分布;(c)出射光线角度

Fig. 5 Design results of illumination optical system. (a) Optical path of illumination optical system after optimization design; (b) illumination distribution on irradiation surface; (c) angle of outgoing light

由图 5 可知,照明光学系统出射光线的发散角为  $1.48^\circ$ ,照明光学系统辐照面最大辐照度为  $2617 \text{ W/m}^2$ ,最小辐照度为  $2541 \text{ W/m}^2$ ,具有很好的匀光效果<sup>[20]</sup>。辐照均匀性  $\epsilon$  可以表示为

$$\epsilon = 1 - \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \times 100\% = 98.53\% \quad (2)$$

### 3.2 光场测量光学系统设计

根据标准散射体定标模型可知,为了拓展定标后标准散射体的使用范围,光场测量光学系统的散射角度测量范围与前向散射仪工作角度区间相同,为

$20^\circ \sim 50^\circ$ <sup>[14]</sup>。标准散射体位于光场测量光学系统中心位置。光场测量光学系统选用离轴折返式光学系统作为初始结构,并需对半球穹顶、非球面反射镜、全景成像系统进行优化设计。优化后光学系统结构如图 6 所示。

光场测量光学系统优化后全视场范围内光斑几何半径(GEO半径)小于  $22 \mu\text{m}$ ,  $110 \text{ lp/mm}$  处调制传递函数(MTF)值大于 0.3。点列图和 MTF 曲线分别如图 7 和图 8 所示。

为了验证光场测量光学系统的散射角度范围及

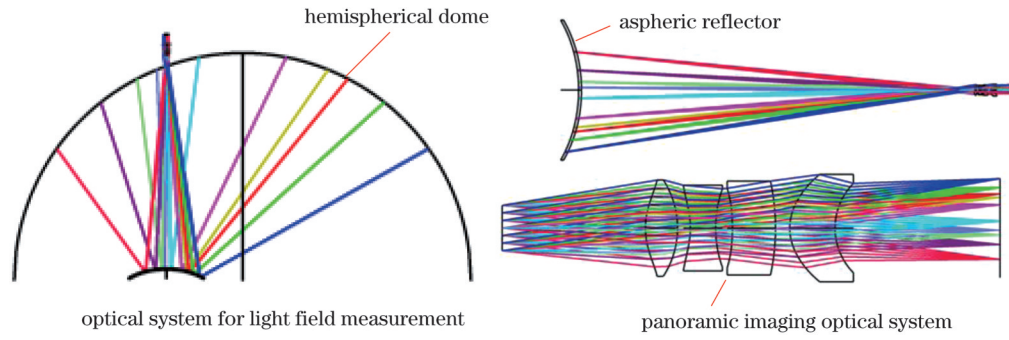


图 6 优化后光学系统

Fig. 6 Optical system after optimization

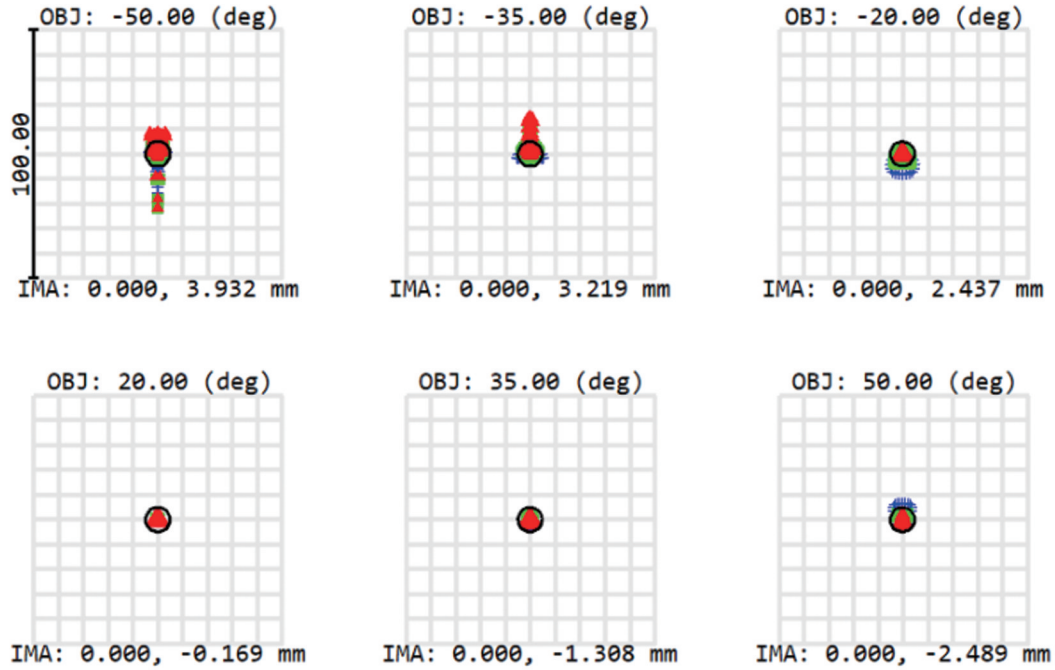


图 7 光学系统点列图

Fig. 7 Point array diagram of optical system

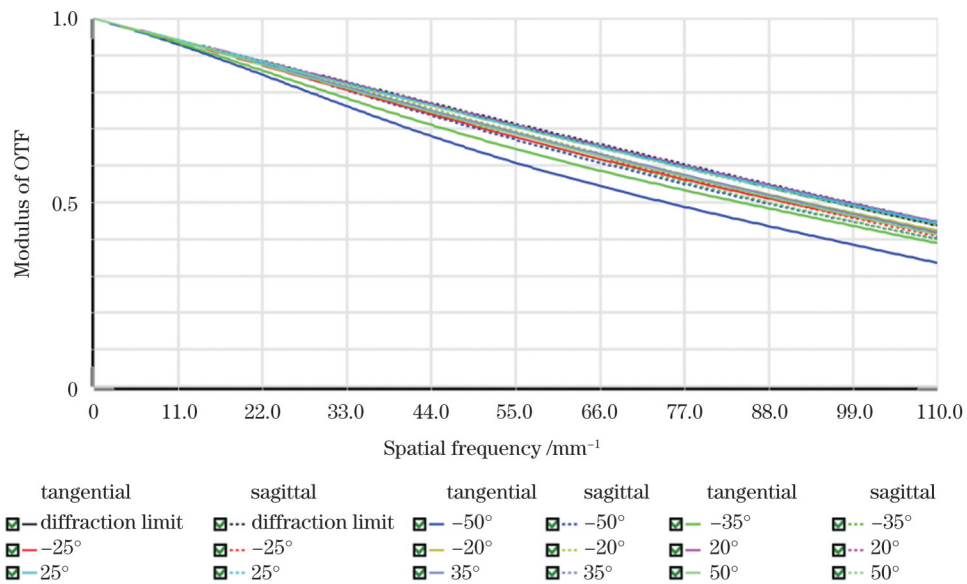


图 8 光学系统 MTF 曲线

Fig. 8 MTF curves of optical system

分辨率,在半球穹顶内壁设置灯阵,模拟穹顶内壁所接收的散射光场位置。灯阵的俯仰角范围为  $20^\circ \sim 50^\circ$ ,间隔为  $1^\circ$ ;灯阵的方位角范围  $0^\circ \sim 360^\circ$ ,间隔为  $15^\circ$ ;灯阵的角度坐标依次为  $(20^\circ, 0^\circ), (20^\circ, 15^\circ),$

$(20^\circ, 30^\circ), \dots, (50^\circ, 345^\circ)$ ,与半球穹顶内壁位置坐标一一对应。灯阵模型俯视图与仿真模型如图 9 所示。

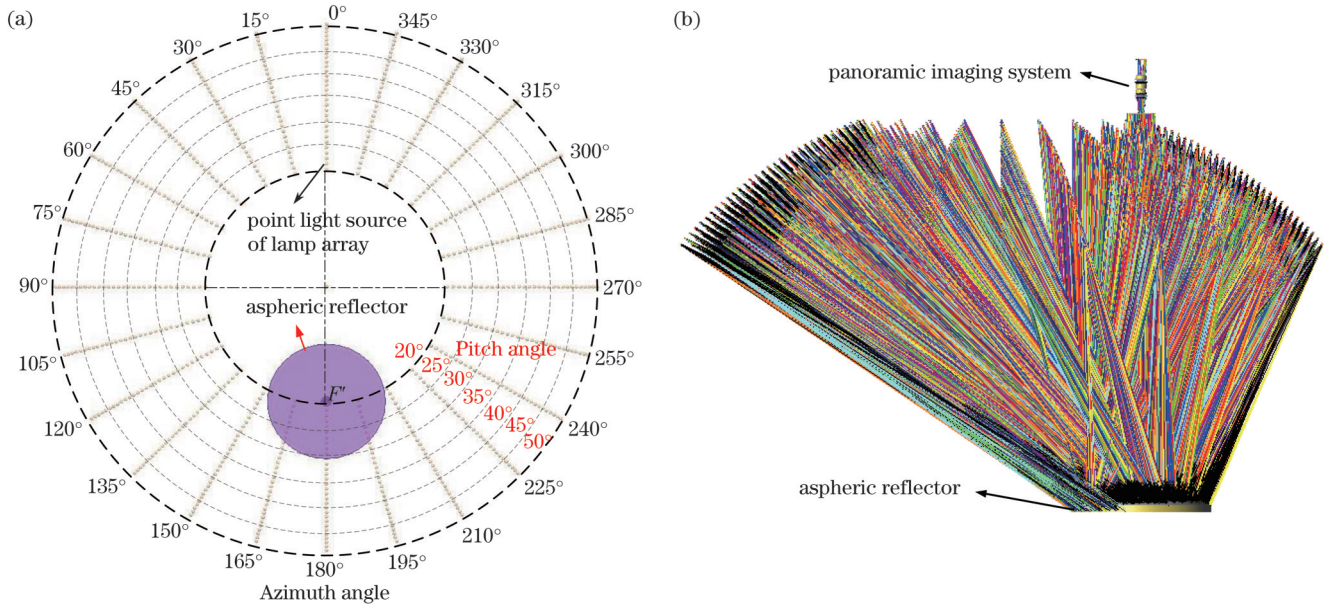


图 9 散射角度及分辨率验证灯阵与仿真模型。(a)灯阵模型俯视图;(b)仿真模型

Fig. 9 Scattering angle and resolution verification lamp array and simulation model. (a) Top view of lamp array model; (b) simulation model

光场测量光学系统散射角度测量范围及分辨率仿真结果如图 10 所示。

根据图 10 可知,光场测量光学系统测量散射角度范围为  $20^\circ \sim 50^\circ$ ,角度分辨率为  $1^\circ$ 。

由于光场测量光学系统为离轴光学系统,因此需要仿真周视角度分辨率。根据图 10 可知,散射角度为  $20^\circ$  时,光场测量光学系统间隔  $15^\circ$  的成像位置较为紧密,因此,以固定角度间隔建立周视分辨率验证灯阵,经验证光场测量光学系统的周视角度分辨率为  $2^\circ$ 。仿真结果如图 11 所示。

#### 4 标准散射体定标系统能量校准方法

考虑半球穹顶二次反射<sup>[21]</sup>以及光场测量光学系统渐晕等造成的能量损失等,可以将已知散射光场分布的散射体做为先验散射体,进而利用先验散射体的散射光场分布,计算其在光场测量光学系统像面上的理想散射光场照度分布,并与经标准散射体定标系统测得的先验散射体的散射光场照度分布进行比较,即可完成标准散射体定标系统的能量校准。标准散射体定标系统能量校准流程如图 12 所示。

选用先验散射体作为定标系统的校准样品,先验散射体的散射光场可以表示为

$$f_i(\theta_i, \varphi_i; \theta_t, \varphi_t) \approx \frac{L_t(\theta_i, \varphi_i; \theta_t, \varphi_t)}{E_i(\theta_i, \varphi_i)}, \quad (3)$$

式中:  $L_t(\theta_i, \varphi_i; \theta_t, \varphi_t)$  为散射方向辐射亮度;  $E_i(\theta_i, \varphi_i)$  为光源入射方向辐射照度。

根据式(3)求出先验散射体在光场测量光学系统像面上的理想散射光场照度分布,记为矩阵  $E_1 =$

$$\begin{bmatrix} E_{111} & E_{112} & \dots & E_{11j} \\ E_{121} & E_{122} & \dots & E_{12j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{1i1} & E_{1i2} & \dots & E_{1ij} \end{bmatrix}, \text{其中}(i, j) \text{为光场测量光学系统}$$

像面感光单元分辨率,即光场测量光学系统中 CCD 的行列像素个数,  $E_{ij}$  为先验散射体的理想散射光场在相应感光单元上的照度量值。

实测散射光场照度分布可由先验散射体、照明光学系统以及光场测量光学系统建立仿真模型获得,记

$$\text{作 } E_M = \begin{bmatrix} E_{M11} & E_{M12} & \dots & E_{M1j} \\ E_{M21} & E_{M22} & \dots & E_{M2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{Mi1} & E_{Mi2} & \dots & E_{Mij} \end{bmatrix}。 \text{同理,其中 } E_{Mij} \text{ 为}$$

仿真得到的先验散射体散射光场在相应的感光单元上的照度。

此时,定标系统能量校准矩阵可以记作  $E_C =$

$$\begin{bmatrix} E_{C11} & E_{C12} & \dots & E_{C1j} \\ E_{C21} & E_{C22} & \dots & E_{C2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{Ci1} & E_{Ci2} & \dots & E_{Cij} \end{bmatrix}, \text{其中, } E_{Cij} = E_{Mij} / E_{ij}。$$

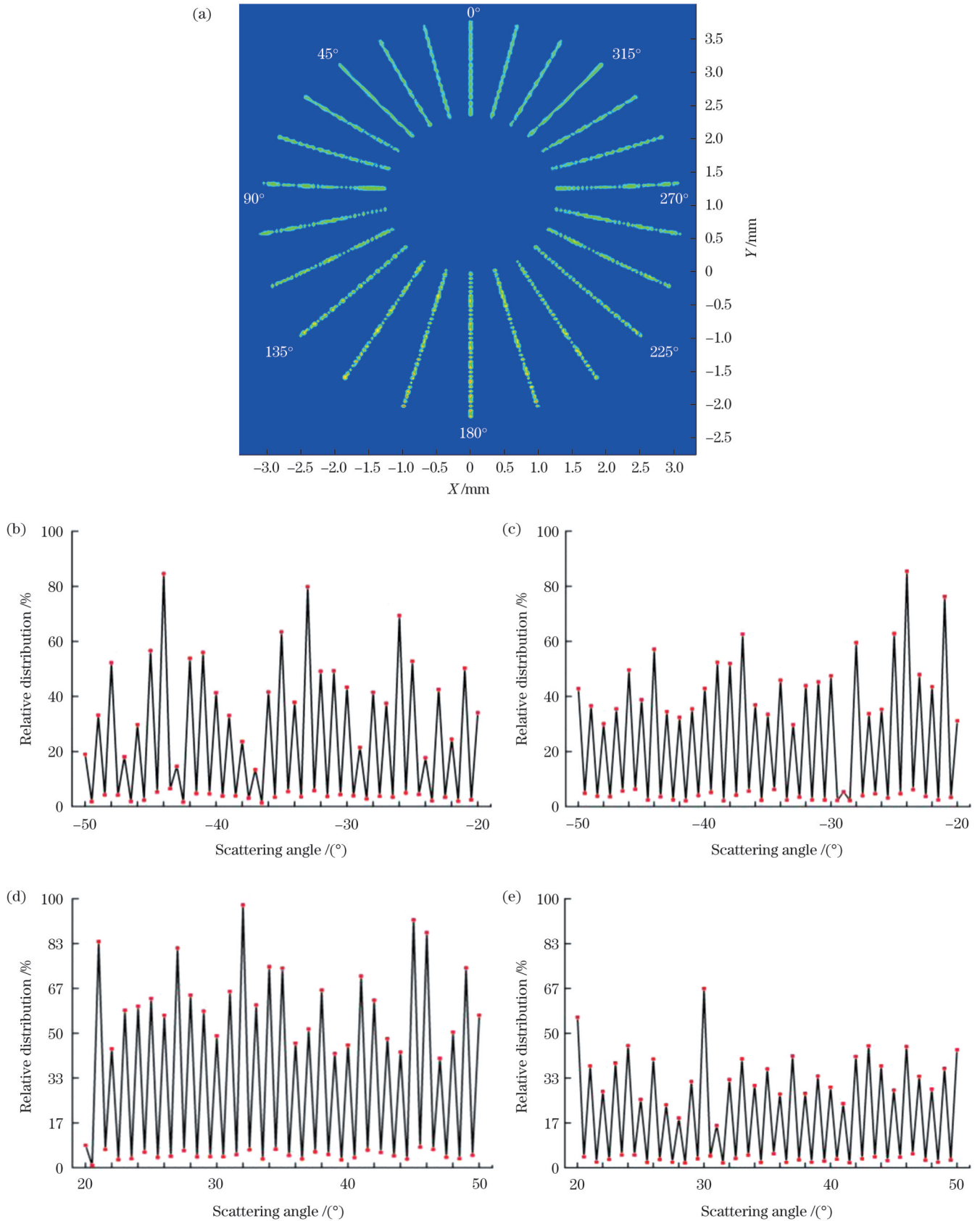


图 10 散射角度测量范围及分辨率仿真结果。(a)分辨率仿真结果;(b)方位角 $0^\circ$ 时辐照度相对分布;(c)方位角 $90^\circ$ 时辐照度相对分布;(d)方位角 $180^\circ$ 时辐照度相对分布;(e)方位角 $270^\circ$ 时辐照度相对分布

Fig. 10 Scattering angle measurement range and resolution simulation results. (a) Resolution simulation results; (b) relative distribution of irradiance at azimuth angle of  $0^\circ$ ; (c) relative distribution of irradiance at azimuth angle of  $90^\circ$ ; (d) relative distribution of irradiance at azimuth angle of  $180^\circ$ ; (e) relative distribution of irradiance at azimuth angle of  $270^\circ$

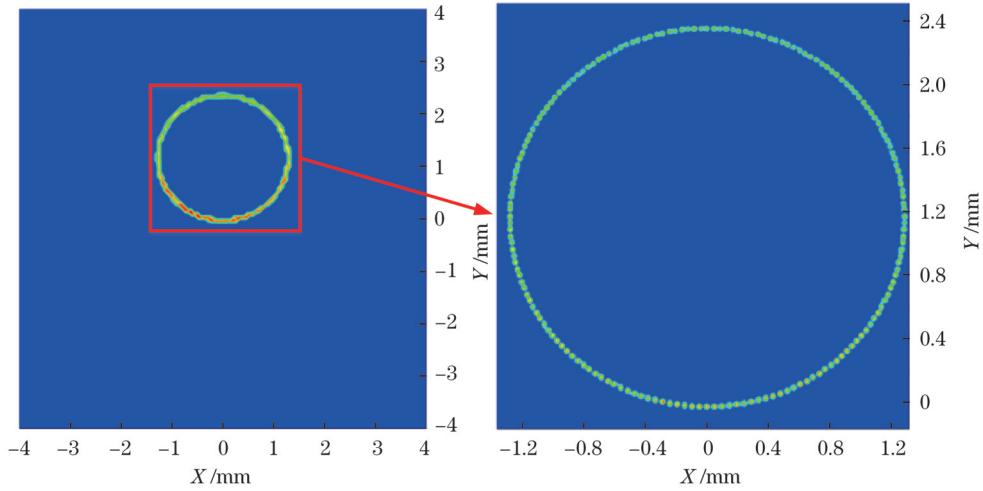


图 11 周视角分辨率仿真

Fig. 11 Simulation of circumferential angle resolution

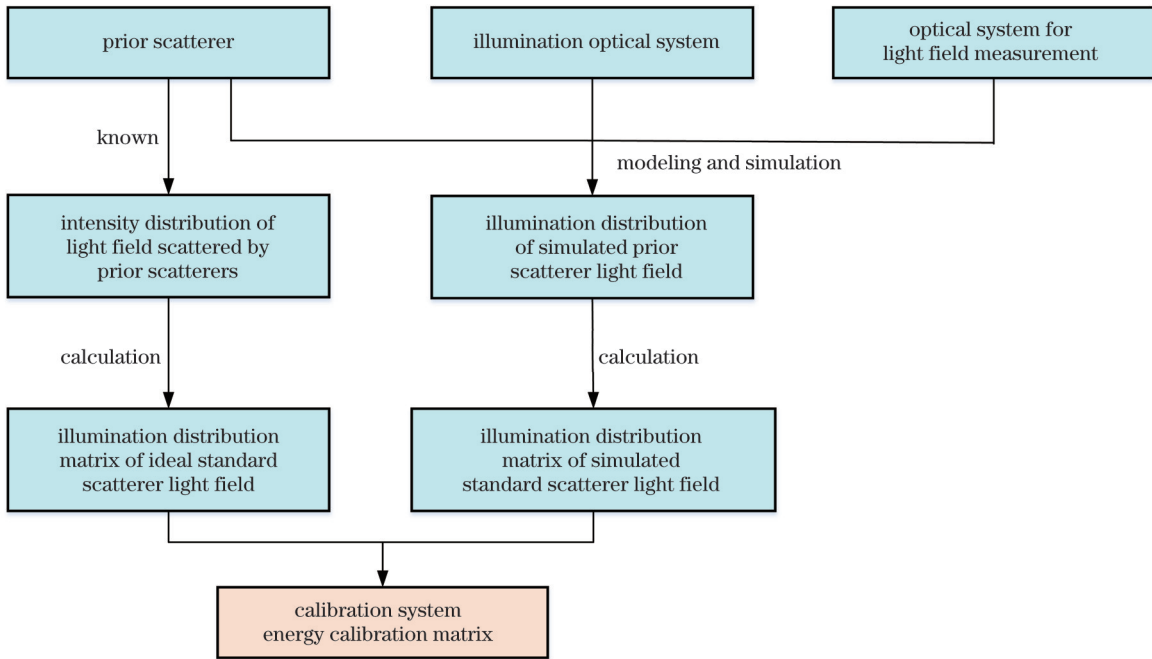


图 12 能量校准流程图

Fig. 12 Flow chart of energy calibration

## 5 定标方法精度验证

由于理想 2700 K 色温白炽灯光源并不存在,同时目前缺少针对前向散射仪的符合 MOR 定义的光谱误差评价标准<sup>[22]</sup>,导致无法利用现有光源开展可溯源至 MOR 定义的标准散射体定标方法的具体实验验证。为此,利用 Light tools 软件中的理想 2700 K 色温光谱作为光源光谱,通过仿真验证标准散射体定标方法的精度与正确性,根据标准散射体定标系统能量校准流程,利用标准朗伯散射体作为先验散射体,配合文中设计的照明光学系统和光场测量光学系统建立定标方法精度验证模型如图 13 所示。仿真获得标准朗伯散射体的散射光场照度分布如图 14 所示。

根据图 14 以及标准散射体定标系统能量校准流程,可以得到能量校准后的周视平均相对误差如图 15 所示,其中散射角度为 31° 时误差最大,为 2.28%。

经能量校准后定标系统测得标准朗伯散射体在 20°~50° 所表征的 MOR 量值和对应的定标误差如图 16 所示。

由图 16 可知,标准朗伯散射体 20°~50° 所表征的 MOR 量值范围为 6.54~45.74 m,其中散射角度为 20° 时定标绝对误差最大为 -2.41 m,优于 ICAO 规定的“在 MOR 600 m 范围内,绝对误差小于等于 ±50 m”要求<sup>[23]</sup>的 1/10,符合校准仪器的精度原则<sup>[24]</sup>。因此,经定标方法定标后的标准散射体可溯源至 MOR 定义且满足前向散射仪外场校准的精度需求。



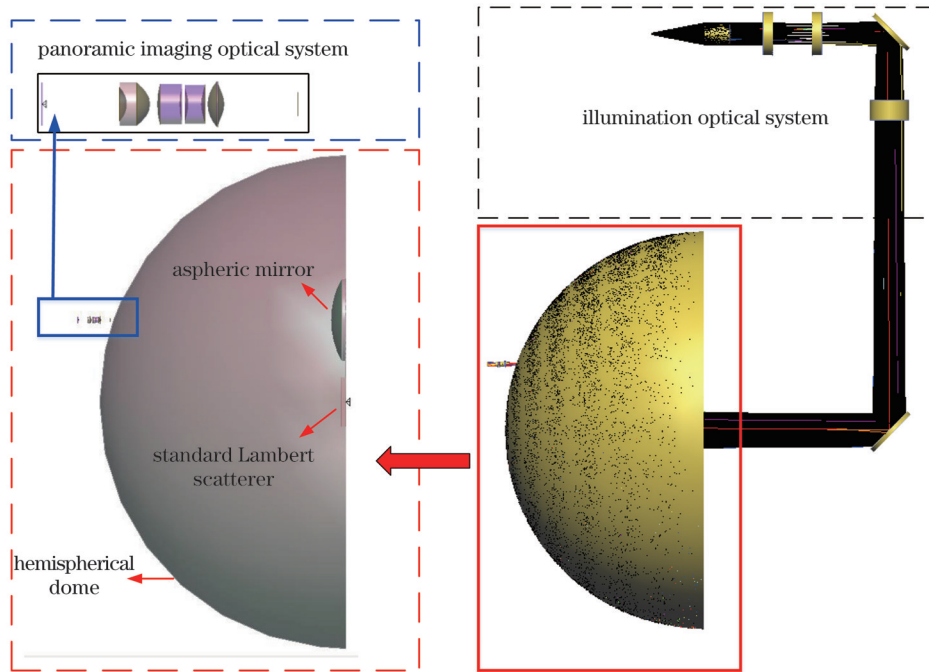


图 13 定标方法精度验证模型

Fig. 13 Accuracy verification model for calibration method

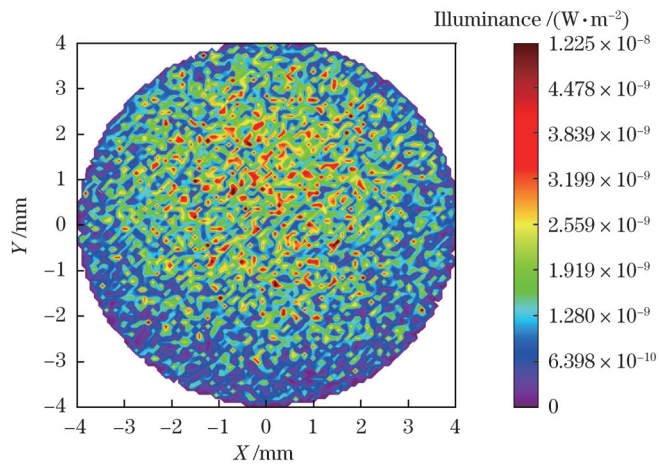


图 14 标准朗伯散射体散射光场照度分布

Fig. 14 Illuminance distribution of scattered light field of standard Lambert scatterer

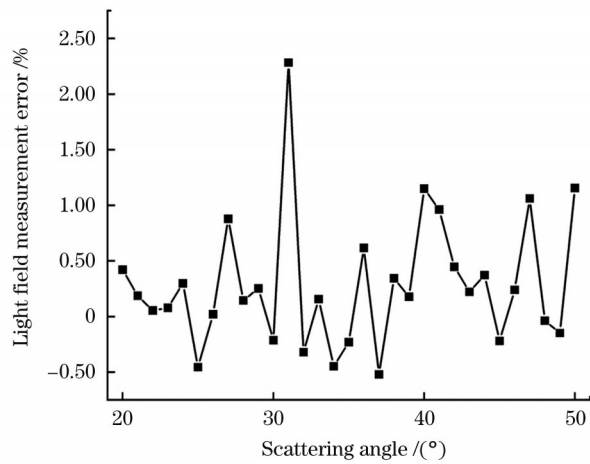


图 15 标准散射体定标系统能量校准平均相对误差

Fig. 15 Average relative error of energy calibration of standard scatterer calibration system

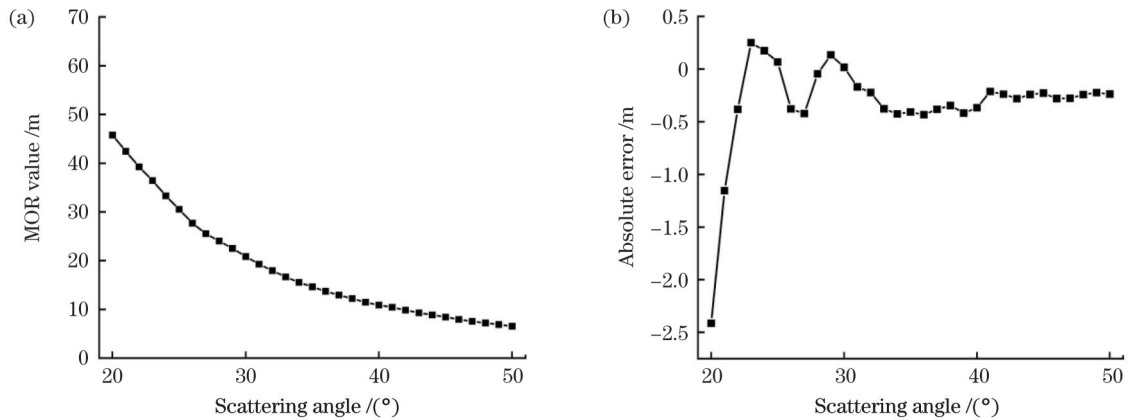


图 16 标准朗伯散射体所表征的 MOR 量值和对应的定标误差。(a) MOR 量值; (b) 定标的绝对误差

Fig. 16 MOR magnitude and corresponding calibration error characterized by standard Lambert scatterer. (a) MOR magnitude; (b) absolute error of calibration

## 6 结 论

本文提出了一种可溯源至 MOR 定义的标准散射体定标方法,建立了相应的标准散射体定标模型,确定了一种由照明光学系统和光场测量光学系统两部分组成的标准散射体定标系统架构及其工作原理。优化设计了均匀照明光学系统,仿真分析了其均匀性和发散角,均匀性达到 98% 以上,发散角为  $1.48^\circ$ ;优化设计了光场测量光学系统,利用光源灯阵模型,仿真验证了散射角度范围为  $20^\circ \sim 50^\circ$ ,定标散射角度分辨率为  $1^\circ$ ,定标周视角度分辨率为  $2^\circ$ 。研究了一种已知光场分布的先验散射体的定标系统能量校准方法,制订了相应的定标系统能量校准流程。建模并仿真分析了能量校准误差,验证了可溯源至 MOR 定义的标准散射体定标方法精度,其中:散射角度范围在  $20^\circ \sim 50^\circ$  的能量校准平均相对误差在  $\pm 3\%$  以内,最大误差出现在散射角度为  $31^\circ$  时,为 2.28%;定标系统测得的标准朗伯散射体在散射角度  $20^\circ \sim 50^\circ$  时所表征的 MOR 量值范围为 6.54~45.74 m,散射角度为  $20^\circ$  时定标绝对误差最大,为  $-2.41$  m。经定标方法定标后的标准散射体可溯源至 MOR 定义且满足前向散射仪外场校准的精度需求,解决了标准散射体的标定无法溯源到 MOR 定义的难题,为完善能见度量值传递与溯源体系提供了技术基础。

## 参 考 文 献

- [1] World Meteorological Organization. Guide to meteorological instruments and methods of observation (WMO-no. 8) [M]. Geneva: World Meteorological Organization (WMO), 2018.
- [2] Griggs D J, Cummins K L, Maier M W, et al. The first WMO inter-comparison of visibility measurement: final report [R]. Geneva: World Meteorological Organization (WMO), 1989.
- [3] Kim K W. The comparison of visibility measurement between image-based visual range, human eye-based visual range, and meteorological optical range[J]. Atmospheric Environment, 2018, 190: 74-86.
- [4] 王青梅, 谢邦力, 梅品琛, 等. 前向散射仪测量能见度的原理和

- 标定方法探讨[J]. 气象水文海洋仪器, 2001, 18(4): 10-16.
- Wang Q M, Xie B L, Mei P C, et al. Discussing the theory and calibration of the forward scatter meter[J]. Meteorological Hydrological and Marine Instrument, 2001, 18(4): 10-16.
- [5] Bloemink H I. KNMI visibility standard for calibration of scatterometers[EB/OL]. [2022-10-06]. [https://library.wmo.int/pmb\\_ged/wmo-td\\_1354\\_en/P3\(26\)\\_Bloemink-Ms\\_Netherlands.pdf#:~:text=The%20visibility%20standard%20of%20KNMI%20can%20be%20used,a%20check%20of%20the%20linearity%20of%20the%20FD12P.](https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo-td_1354_en/P3(26)_Bloemink-Ms_Netherlands.pdf#:~:text=The%20visibility%20standard%20of%20KNMI%20can%20be%20used,a%20check%20of%20the%20linearity%20of%20the%20FD12P.)
- [6] 王緬, 刘文清, 陆亦怀, 等. 气溶胶前向散射大气能见度测量系统传递系数的标定及校准方法[J]. 光学技术, 2008, 34(3): 334-337.
- Wang M, Liu W Q, Lu Y H, et al. Calibration and correction methods for the transform coefficients of the atmospheric visibility system by aerosol forward-scattering theory[J]. Optical Technique, 2008, 34(3): 334-337.
- [7] 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.
- [8] Tai H D, Zhuang Z B, Jiang L H, et al. Visibility measurement in an atmospheric environment simulation chamber[J]. Current Optics and Photonics, 2017, 1(3): 186-195.
- [9] Chong W, Bian Z Q, Chu J H, et al. A method for calibrating forward scatter meters indoors[J]. Metrologia, 2020, 57(6): 065030.
- [10] 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.
- 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.
- [11] 张健, 张国玉, 徐达, 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设计[J]. 光子学报, 2017, 46(6): 0622001.
- Zhang J, Zhang G Y, Xu D, et al. Optical system design of the standard scattering plate calibration system used in calibration visibility meter[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(6): 0622001.
- [12] 余荣斌. 改进小角前向光散射法颗粒测试理论与技术研究[D]. 广州: 华南师范大学, 2002.
- Yu R B. Study on theory and technology of particle measurement by improved small angle forward light scattering method[D]. Guangzhou: South China Normal University, 2002.
- [13] Jonsson J C, Brandén H. Obtaining the bidirectional transmittance distribution function of isotropically scattering materials using an integrating sphere[J]. Optics Communications, 2007, 277(2): 228-

- 236.
- [14] Winstanley J V, Adams M J. Point visibility meter: a forward scatter instrument for the measurement of aerosol extinction coefficient[J]. *Applied Optics*, 1975, 14(9): 2151-2157.
- [15] 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.
- [16] 张宇, 付跃刚, 张健, 等. 用于标准散射体定标的均匀照明光学系统设计[J]. *长春理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 42(2): 69-73, 89.  
Zhang Y, Fu Y G, Zhang J, et al. Optical system design of uniform lighting for standard scattering body calibration[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 42(2): 69-73, 89.
- [17] Zhao J, Xiao S R, Wu X H, et al. Parallelism detection of visibility meter's probe beam and the effect on extinction coefficient measurement[J]. *Optik*, 2017, 128: 34-41.
- [18] 张燃, 张国玉, 张健, 等. 大面积发散太阳模拟器的均匀照明[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(3): 552-560.  
Zhang R, Zhang G Y, Zhang J, et al. Uniform illumination method for large-area divergent solar simulators[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(3): 552-560.
- [19] 王国名, 张国玉, 刘石, 等. 提高太阳模拟器辐照均匀性的光学系统优化设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(1): 012204.  
Wang G M, Zhang G Y, Liu S, et al. Optical system optimization of improving solar simulator irradiation uniformity[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(1): 012204.
- [20] 彭浩文, 苏拾, 张国玉, 等. 太阳模拟器用变曲率光学积分器研究与设计[J]. *光学学报*, 2022, 42(7): 0708001.  
Peng H W, Su S, Zhang G Y, et al. Research and design of variable curvature optical integrator for solar simulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(7): 0708001.
- [21] Zou Y Y, Zhang L, Zhang J, et al. Synchronous measurement method of a multi-angle scattered light field[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(9): 2275-2283.
- [22] Liang J, Zhang G Y, Zhang J, et al. Influence of transmissometers' light source spectral distribution in measuring visibility[J]. *Optics Communications*, 2021, 499: 127294.
- [23] International Civil Aviation Organization. Annex 3 to the convention on international civil aviation: meteorological service for international air navigation[R]. Montreal: International Civil Aviation Organization (ICAO), 2007: ATT A-1.
- [24] 马宏, 王金波. 仪器精度理论[M]. 2版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2014.  
Ma H, Wang J B. Instrument precision theory[M]. 2nd ed. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2014.

## Calibration Method of Standard Scatterer Traceable to MOR Definition

Niu Zhengjie<sup>1</sup>, Zhang Jian<sup>1,2,3\*</sup>, Zhang Guoyu<sup>1,2,3</sup>, Zou Yangyang<sup>4</sup>, Duan Zongtao<sup>1</sup>, Zhao Bin<sup>1</sup>,  
Yang Junjie<sup>1</sup>, Ren Taiyang<sup>1</sup>, Mo Xiaoxu<sup>1</sup>, Zhang Jianliang<sup>5</sup>

<sup>1</sup>College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

<sup>2</sup>Optical Measurement and Control Instrumentation, Jilin Province Engineering Research Center, Changchun 130022, Jilin, China;

<sup>3</sup>Key Laboratory of Optoelectronic Measurement and Control and Optical Information Transmission Technology, Ministry of Education, Changchun 130022, Jilin, China;

<sup>4</sup>College of Instrument Science and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130012, Jilin, China;

<sup>5</sup>The Second Training Group of Flight Training Base of Air Force Aviation University, Changchun 130022, Jilin, China

### Abstract

**Objective** As an indispensable visibility ground-based observation instrument in atmospheric environment monitoring, the forward scatterometer currently adopts the standard scatterer external field calibration method, that is, multiple standard scatterers with different scattering characteristics are placed in the working light path in turn, so as to transfer the measured values of the forward scatterometer to the scattering characteristics calibration results of the standard scatterer. For the calibration of standard scatterers, the calibration method based on the field comparison test between the forward scatterometer and the atmospheric transmission meter is widely used internationally at present, which can trace the calibration results of standard scatterers to the calibration accuracy of the neutral density attenuator used to calibrate the atmospheric transmission meter. However, this method has complex process, many error transmission links, serious influence from weather conditions, long calibration time, and low efficiency. Moreover, the calibrated standard scatterer can only be used for the field calibration of a specific type of forward scatterometer, which has poor universality. At the same time, the field calibration results of the forward scatterometer are subject to the traceability chain of the measured values of the atmospheric transmittance, and because the calibration light sources for calibrating the neutral density attenuator of the atmospheric transmittance are mostly tungsten halogen lamps, xenon lamps and monochrome or white LEDs, the spectral distribution is different from that of the 2700 K color temperature incandescent lamps in the definition of meteorological optical range (MOR), the field calibration results of the forward scatterometer cannot be traced to the definition of MOR. In this paper, a calibration method of standard scatterers traceable to the definition of MOR is proposed, and a calibration optical system of standard scatterers used to calibrate the forward scattering visibility meter is designed. The synchronous calibration of multiple scattering angles is realized, the calibration time is greatly shortened, and the universality is strong. At the same time, the problem that the calibration of standard scatterers cannot be traceable to the definition of MOR is solved, providing a technical basis for improving the transmission and traceability system of visibility values.

**Methods** According to the standard scatterer calibration method, a standard scatterer multi-angle synchronous calibration optical

system architecture is determined, and a standard scatterer calibration optical system is designed for calibrating the forward scattering visibility meter. The standard scatterer calibration system is divided into an illumination optical system and a light field measurement optical system. The illumination optical system includes a light source, a shaping lens, a double-row fly-eye lens and a collimating lens group. The optical system for light field measurement is mainly composed of standard scatterer, hemispherical dome, aspheric reflector, panoramic imaging system and charge-coupled device (CCD) cameras. The illumination optical system and light field measurement optical system are optimized, and a calibration system energy calibration method is studied. The energy calibration error of the calibration system is simulated using standard Lambert scatterers.

**Results and Discussions** The spectral distribution simulation based on the ideal 2700 K color temperature incandescent lamp verifies the calibration accuracy of the standard scatterer calibration method traceable to the definition of MOR. The designed standard scatterer calibration optical system realizes multi-angle synchronous calibration with pitch angle of  $20^{\circ}$ – $50^{\circ}$  and azimuth angle of  $0^{\circ}$ – $360^{\circ}$  (Fig. 4). The study on the energy calibration method of the calibration system shows that when the standard scatterer calibration system conducts energy calibration within the range of  $20^{\circ}$ – $50^{\circ}$  of the scattering angle, the maximum circumferential average relative error is 2.28% when the scattering angle is  $31^{\circ}$  (Fig. 15), which proves the improvement in calibration accuracy of the standard scatterer. The simulation verification shows that the magnitude range of MOR represented by the standard Lambert scattering angle of  $20^{\circ}$ – $50^{\circ}$  is 6.54–45.74 m, which conforms to the definition of MOR by the World Meteorological Organization, and the maximum absolute error is  $-2.41$  m (Fig. 16).

**Conclusion** Using the standard scatterer calibration method that can be traced back to the definition of MOR, a standard scatterer calibration optical system used to calibrate the forward scattering visibility meter is successfully designed, and the multi-angle synchronous calibration with pitch angle of  $20^{\circ}$ – $50^{\circ}$  and azimuth angle of  $0^{\circ}$ – $360^{\circ}$  is realized. The maximum absolute error of the standard scatterer calibrated by the calibration method is better than 1/10 of the measurement accuracy requirement of the forward scatterometer specified by International Civil Aviation Organization (ICAO), providing theoretical basis and technical support for the calibration of the standard scatterer traceable to the definition of MOR.

**Key words** measurement; meteorological optical range; standard scatterer; scattered light field; calibration accuracy; energy calibration error