

doi:10.3788/gzxb20174603.0312003

用于校准能见度仪的标准散射体定标系统的校准方法

张健¹, 张国玉^{1,2,3}, 孙高飞^{1,2,3}, 苏拾^{1,2,3}, 张建良⁴

(1 长春理工大学, 长春 130022)

(2 光电测控与光电信息传输技术教育部重点实验室, 长春 130022)

(3 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 长春 130022)

(4 空军航空大学, 长春 130022)

摘 要: 为了实现对用于校准能见度仪的标准散射体的快速准确定标, 通过测量标准散射体不同散射角的散射系数, 实现对标准散射体不同散射角所模拟的大气能见度进行准确定标并对定标系统进行校准。根据定标系统的组成与工作原理, 确定定标系统的校准方法并建立相应的校准链, 并设计校准链的各组成部分的校准方法。通过对已知散射系数的标准散射体进行定标, 验证校准后定标系统定标结果的准确性, 进而验证了定标系统校准方法的正确性。实验结果证明: 定标系统对标准散射体的散射系数定标结果的误差为 7.93%; 经由定标系统定标的标准散射体所模拟的大气能见度的最大误差为 8.61%, 满足用于校准能见度仪的标准散射体的使用要求。

关键词: 前向散射式能见度仪; 能见度测量; 校准; 散射测量; 标准散射体

中图分类号: TH765.8+3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)03-0312003-9

Calibration Method for Standard Scattering Plate Calibration System Used in Calibrating Visibility Meter

ZHANG Jian¹, ZHANG Guo-yu^{1,2,3}, SUN Gao-fei^{1,2,3}, SU Shi^{1,2,3}, ZHANG Jian-liang⁴

(1 Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Key Laboratory of Optical Control and Optical Information Transmission Technology, Department of Education, Changchun 130022, China)

(3 Optical Measurement and Control Instrumentation, Jilin Province Engineering Research Center, Changchun 130022 China)

(4 Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to realized the rapid and accurate calibrating of the standard scattering plate used in calibrating visibility meter, calibrating the simulated atmospheric visibility by measuring the scattering coefficient of multiple scattering angle of the standard scattering plate, and the calibration system was calibrated. According to the composition and working principle of the calibration system, the calibration method was determined, the calibration chain of the calibration system was established, and the calibration method for each step of the the calibration chain was designed. By calibrating the standard scattering plate with a given scattering coefficient, the veracity of the calibration result of the calibration system and the correctness of the calibration method were verified. The experimental results prove that the error of the calibration results of scattering coefficient of standard scattering plate is 7.93%, the error of the simulating visibility of the standard scattering plate calibrated by the calibration system is

基金项目: 国家公益性行业科技专项(Nos. GYHY200706003, GYHY201006043)资助

第一作者: 张健(1989-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为气象仪器、光电仪器与检测技术。Email: zhangjian_nr@126.com

导师(通讯作者): 张国玉(1962-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为空间科学与技术、光电仪器与检测技术等。Email: zh_guoyu@163.com

收稿日期: 2016-11-01; 录用日期: 2016-12-30

<http://www.photon.ac.cn>

8.61%, satisfied the requirements of the standard scattering plate used in calibrating visibility meter.

Key words: Forward scattering visibility meter; Visibility measurement; Calibration; Scattering measurement; Stander scattering plate

OCIS Codes: 120.4800; 150.1488; 280.1310; 290.4210; 120.5820; 010.1310

0 引言

大气水平能见度是表征近地表大气污染程度的重要物理量,对航空、航海、交通及军事行动等都有重要影响.测量能见度的主要仪器有透射式能见度仪、前向散射能见度仪、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.前向散射能见度仪安装、使用和维护方便,因此前向散射能见度仪应用最为广泛.但当前前向散射式能见度仪在一定能见度范围内仍会出现较大的测量误差,因此国内外对如何进一步提高前向散射式能见度仪的定标准确度均作了相关研究.

王青梅等利用定标好的前向散射式能见度仪制作多块标准模板对前向散射式能见度仪进行现场定标^[1].朱乐坤等提出了前向散射式能见度仪的实验室定标条件和方法,梳理了前向散射式能见度仪现场光学装置校准、校准板校准及人工校准方法,为今后建立能见度量值传递体系和编写相关校准规范提供了参考^[2].程寅等提出了利用漫散射板和不同透过率的衰减片组合定量模拟前向散射式能见度仪的多个标准测量点,并通过修正公式对仪器的修正系数进行修正的定标方法^[3].王缅等提出利用两块具有相同透射系数的漫透射板对前向散射式能见度仪的定标方法^[4].荷兰皇家气象研究所提出的 Vaisala FD12P 定标方法中包含有对标准散射体的定标方法,该定标方法可以溯源至实验室定标的中性密度滤波片的透过率准确度,校准时间大约在 2 至 6 个月^[5].目前,国内对前向散射式能见度仪定标技术的研究多集中在对其定标方法的研究,对常用于校准前向散射式能见度仪的标准散射体的定标方法的研究还鲜见报道;同时,国际上现行标准散射体的定标方法存在定标时间长,定标链复杂,定标误差传递环节多,只能在室外进行定标,定标效率低等问题.随着双向散射分布函数测量技术^[6-15]的迅速发展,使得通过测出标准散射体的散射系数完成对其定标成为可能.

针对前向散射式能见度仪的工作散射角度不同的情况^[16-23],提出了一种通过测量标准散射体不同散射角的散射系数从而实现对不同散射角角度所模拟的能见度进行准确定标的定标系统,提升了标准散射体的定标效率.介绍了定标系统的组成与工作原理;提出了定标系统的校准方法并建立了相应的校准链;设计了定标系统校准方法中高均匀性稳定照明系统校准、定标系统空间关系校准以及全景成像能量检测系统能量检测校准等步骤的校准方法;设计实验验证了定标系统定标结果的准确性,进而验证校准方法的正确性.

1 校准原理

气象学上能见度的定义是:标准视力的眼睛在观察水平方向上,以天空为背景的黑体目标,能从背景上分辨出目标物轮廓的最大水平距离^[24].人们在能对能见度做出估计时,常因觉察、分辨能力、光源特性等差别而得到不同的结果.因此,能见度的任何目视估测往往带有主观性.为了客观地对能见度进行定义,反映不以人的视觉变化而变化的大气光学特征,世界气象组织于 1957 年提出用大气透明度对能见度进行衡量,用气象光学视程(Meteorological Optical Range, MOR)表示,并定义为“白炽灯在色温 2 700 K 时发出的平行光束,光通量在大气中衰减至初始值的 5%时所经过的路径长度”^[25].

根据 Koschmieder 定律^[26],以水平天空为背景的黑体目标物,目标物和背景视亮度的对比度表示为

$$R_m = \frac{1}{\sigma} \ln \frac{1}{\epsilon} \quad (1)$$

式中, R_m 为气象光学视程, ϵ 为视觉对比阈值, σ 为大气消光系数.对于气象光学视程表示的大气能见度 V 表示为

$$V = \frac{-\ln \epsilon}{\sigma} \quad (2)$$

大气消光系数 σ 为散射系数 K_s 与吸收系数 K_a 之和,由于光在短距离大气传播时,大气对光的吸收往往是可以忽略不计的,因此大气粒子吸收效应远比散射效应小,可以忽略不计^[27],这个假设同时也是前向散

射式能见度仪的工作前提,已经被重多实验证明^[28-29].因此前向散射式能见度仪测量大气能见度 V 可表示,为

$$V = \frac{-\ln \epsilon}{K_s} \quad (3)$$

根据 Mie 散射理论^[30-31],散射角为 θ 时(θ 在 20° 到 50° 之间)大气粒子的散射光强度 $I(\theta)$ 与大气粒子散射系数 K_s 和入射光强 I_0 之间的关系为^[32]

$$I(\theta) = K_s I_0 \quad (4)$$

世界气象组织规定,视觉阈值取 $\epsilon = 0.05$,大气粒子的散射角为 θ 的散射光强度 $I(\theta)$ 和气象能见度 V 之间的关系为

$$V = \frac{2.996 I_0}{I(\theta)} = \frac{2.996}{I(\theta)/I_0} \quad (5)$$

根据式(5)可知,前向散射式能见度仪只要测得散射光强度 $I(\theta)$ 与入射光强度 I_0 的比值就可以得到相应的大气能见度 V . 校准能见度仪用标准散射体即根据式(3),通过模拟不同的大气散射系数 K_s 实现不同的大气能见度 V 的模拟,从而实现对前向散射式能见度仪的校准.

2 定标系统组成与工作原理

由式(5)可知,用于校准能见度仪的标准散射体定标系统只要测得标准散射体在散射角 θ 方向的散射光强度 $I(\theta)$ 与入射光强度 I_0 的比值即可完成对标准散射体在散射角 θ 方向所模拟的相应大气能见度 V 的定标. 同时由于现有的前向散射式能见度仪的工作散射角都没有统一标准(在 20° 到 50° 之间),因此设计由高均匀性稳定照明系统,低反射率球形屏幕系统以及全景成像能量检测系统三部分组成用于校准前向散射式能见度仪的标准散射体定标系统^[33],该系统可以同时为标准散射体多散射角度的散射系数进行测量,实现对标准散射体多散射角度方向上所模拟大气能见度的定标. 定标系统组成图如图 1 所示.

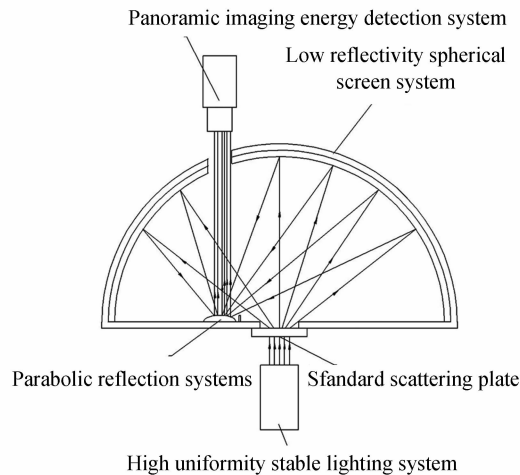


图 1 系统图组成

Fig. 1 System composition

高均匀性稳定照明系统发出的光束均匀照射且穿透标准散射体后照在低反射率球形屏幕系统内表面上,在低反射率球形屏幕系统内表面形成标准散射体散射后的光场分布,利用抛物面反射系统扩大全景成像能量检测系统光学系统的视场,从而实现对整个低反射率球形屏幕系统内壁能量分布的采集,通过全景成像能量检测系统的数据处理系统得出标准散射体多散射角度的散射系数,完成对标准散射体多散射角度方向上所模拟大气能见度的定标. 定标系统工作原理如图 2 所示.

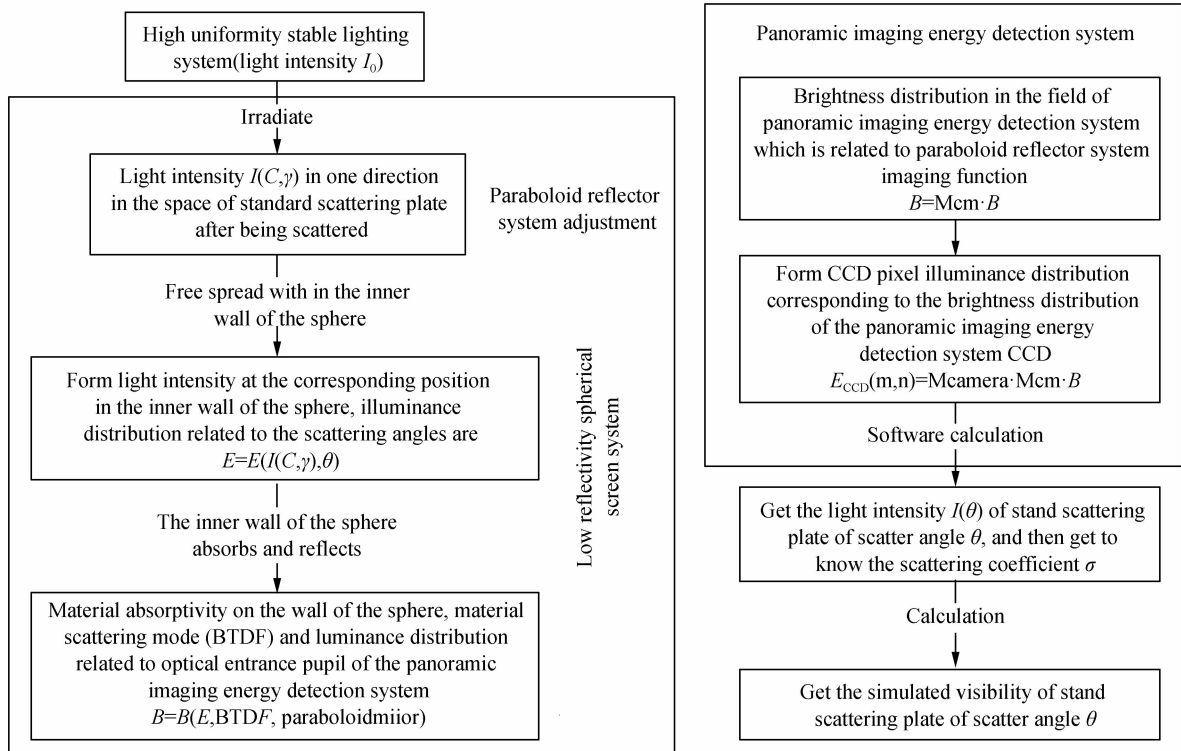


图2 系统工作原理
Fig. 2 Working principle of the system

3 定标系统的校准方法

根据定标系统的组成与工作原理,建立定标系统的校准链如图3所示.整个系统的校准链可以溯源到成像色度计的定标准确度和高准确度校准球形灯阵系统中校准灯阵的位置准确度.

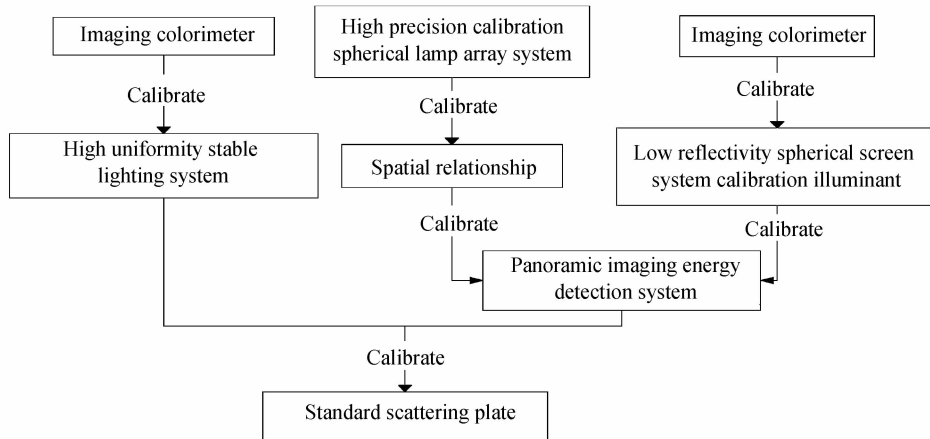


图3 定标系统校准链
Fig. 3 System calibration chain

前向散射式能见度仪在大气能见度测量上存在的标准误差不大于10%^[34],即标准散射体对大气能见度的模拟偏差不大于10%.根据式(5)可知,定标系统校准后,散射光强度 $I(\theta)$ 与入射光强度 I_0 比值的标准误差不大于10%,即定标系统散射系数测量误差不大于9%,定标系统对标准散射体所模拟的能见度的定标偏差不大于10%;定标系统的空间关系校准误差不大于1°.

3.1 高均匀性稳定照明系统校准

根据定标系统的校准方法,需要利用定标过的成像色度计对高均匀性稳定照明系统的出射光强的大小及不稳定性进行校准.其中可以直接用成像色度计测得的高均匀性稳定照明系统的出射光强数值做为高均

匀性稳定照明系统的出射光强的理想出射光强,因此高均匀性稳定照明系统的出射光强的大小不存在有校准误差.高均匀性稳定照明系统不稳定性的计算公式式(6)中, I_0 为高均匀性稳定照明系统理想出射光强, I_t 为高均匀性稳定照明系统的实际出射光强.

$$\delta = \left| \frac{I_t - I_0}{I_0} \right| \times 100\% \quad (6)$$

高均匀性稳定照明系统的出射光强的不稳定性校准结果如图4所示.

在保持高均匀性稳定照明系统理想出射光强 I_0 不变的前提下,随着工作时间的增长,高均匀性稳定照明系统不稳定性逐渐减小,在工作一段时间以后,高均匀性稳定照明系统不稳定性逐渐增大.在相同工作时间内的情形下,随着高均匀性稳定照明系统理想出射光强 I_0 的增长,高均匀性稳定照明系统不稳定性逐渐减小,工作一定时间后,高均匀性稳定照明系统不稳定性出现变大的趋势.高均匀性稳定照明系统的光强不稳定性在240 min内最大为0.975%.

3.2 定标系统空间关系校准

根据图(1)可知,定标系统对标准散射体散射系数的测量存在离轴误差,因此需要对定标系统空间关系进行校准.

定标系统空间关系校准需要利用内部布有已知准确位置的校准灯阵的高准确度校准球形灯阵系统,校准灯阵坐标划分类似天球坐标系,如图5所示.图中 α 为方位角, θ 为俯仰角,即为标准散射体校准能见度仪的工作散射角度, R 为高准确度校准球形灯阵系统半径.

由于前向散射式能见度仪工作散射角度都在 20° 到 50° 之间,因此需重点对俯仰角范围在 20° 到 50° 内进行空间关系校准.首先,用高准确度校准球形灯阵系统代替低反射率球形屏幕系统,使全景成像能量检测系统对高准确度校准球形灯阵系统内校准灯阵成像并得出校准灯阵的实际成像位置矩阵.其次,计算出高准确度校准球形灯阵系统校准灯阵的理想成像位置矩阵,并与实际成像位置矩阵比较,得出定标系统空间关系校准修正矩阵.最后,将空间关系校准修正矩阵输入全景成像能量检测系统完成定标系统空间关系校准.定标系统空间关系校准流程图如图6所示.

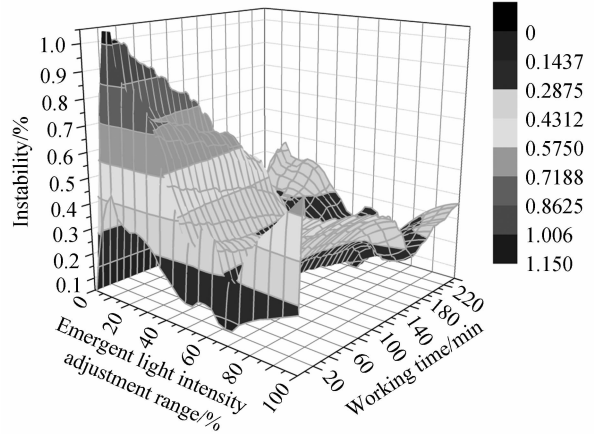


图4 高均匀性稳定照明系统光强不稳定性

Fig.4 Unstability of high uniformity stable lighting system

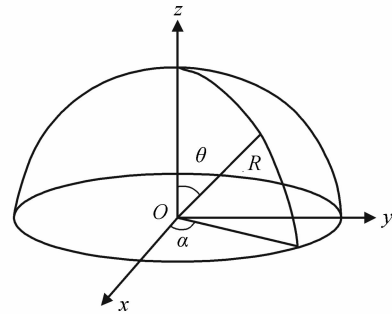


图5 高准确度校准球形灯阵系统中校准灯阵坐标示意图

Fig.5 Calibration lamp array coordinates of high precision calibration spherical lamp array system

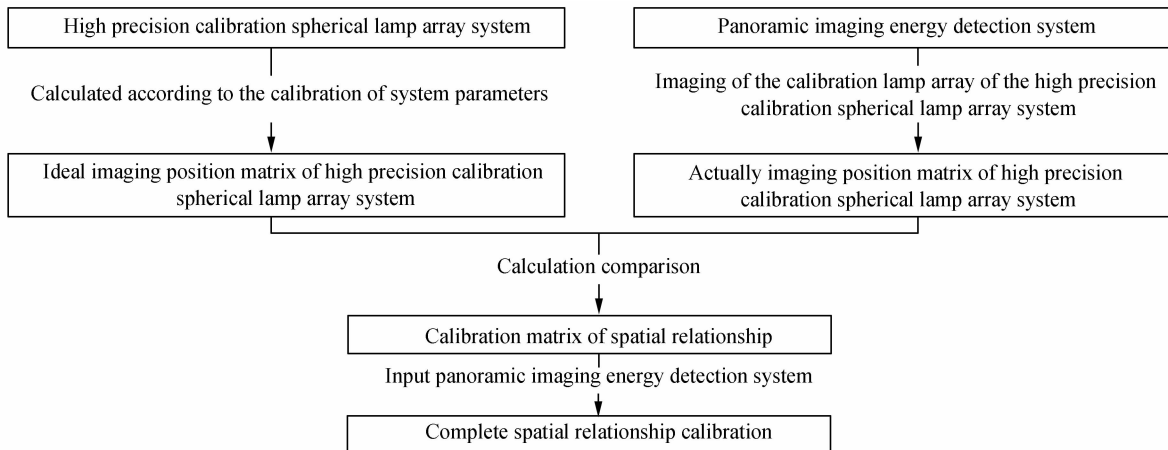


图6 定标系统空间关系校准流程图

Fig.6 Spatial relationship calibration of the calibration system

校准前与校准后高准确度校准球形灯阵系统通过全景成像能量检测系统成像如图 7 所示. 定标系统的定标坐标系与高准确度校准球形灯阵系统中校准灯阵的坐标系重合, 校准后定标系统空间关系校准误差如 8 所示.

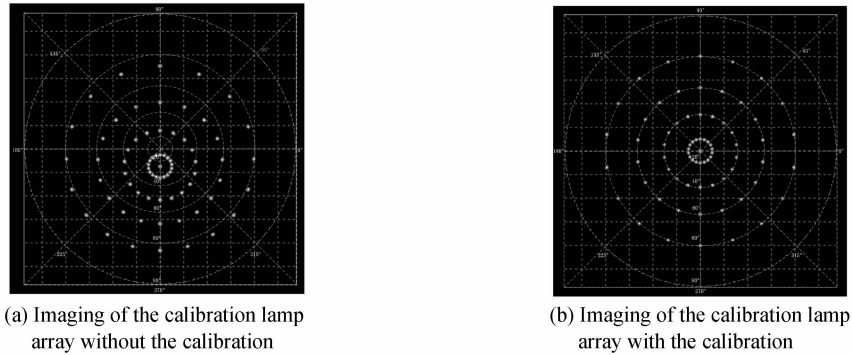


图 7 高准确度校准球形灯阵系统校准灯阵成像图
Fig. 7 Imaging of the calibration lamp array

从图 7 中可以看出, 完成定标系统空间关系校准后, 定标系统的离轴误差得到有效的校正. 从图 8 中可以看出, 俯仰角保持一致时, 定标系统空间关系校准误差基本随方位角从 0° 到 180° 逐渐增加, 从 180° 至 360° 逐渐减小, 同时整体误差变化范围不大; 方位角不变, 定标系统空间关系校准误差随着俯仰角的变大而越低. 俯仰角在 20° 到 50° 范围内定标系统空间关系校准误差基本一致, 最大定标系统空间关系校准误差为 $40.2'$, 满足定标系统的空间关系校准误差的要求.

3.3 全景成像能量检测系统能量检测校准

根据定标系统的校准方法, 设计全景成像能量检测系统能量检测校准方法如下:

1) 利用积分球制成发光角度近似 180° 的近似标准朗伯发光形式的低反射率球形屏幕系统校准光源; 2) 使用成像色度计测量低反射率球形屏幕系统校准光源各个出射角度的发光强度, 得出低反射率球形屏幕系统校准光源的准确发光特性; 3) 利用定标系统对低反射率球形屏幕系统校准光源进行检测, 并将全景成像能量检测系统测得低反射率球形屏幕系统校准光源的发光特性和低反射率球形屏幕系统校准光源的准确光源特性进行比较得出全景成像能量检测系统能量检测的修正系数; 4) 调节低反射率球形屏幕系统校准光源的亮度重复上述三步, 完成全景成像能量检测系统全量程的能量检测校准.

校准完成后全景成像能量检测系统测得的低反射率球形屏幕系统校准光源发光特性相对于低反射率球形屏幕系统校准光源的准确发光特性的全景成像能量检测系统能量检测校准误差如图 9 所示, 最大全景成像能量检测系统能量检测校准误差为 9.38% .

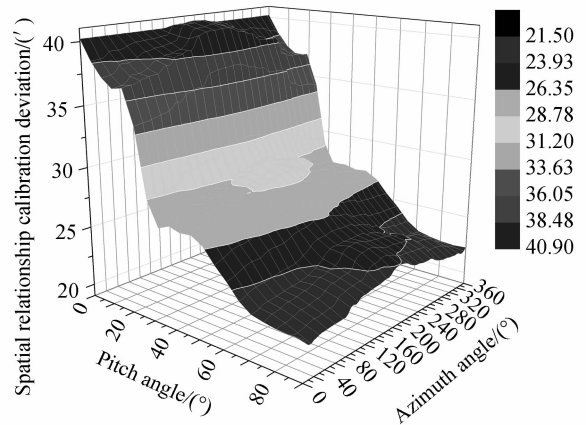


图 8 定标系统空间关系校准误差
Fig. 8 Spatial relationship calibration deviation of calibration system

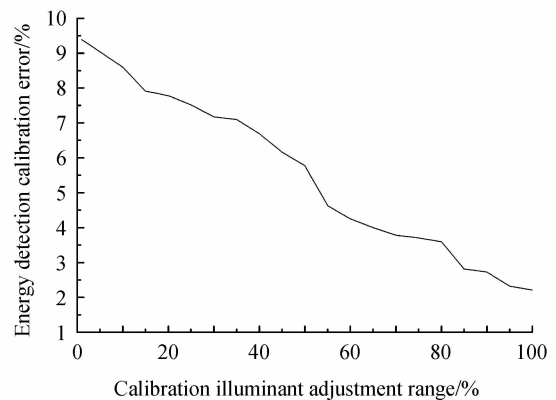


图 9 全景成像能量检测系统能量检测校准误差图
Fig. 9 The energy detection calibration error of panoramic imaging energy detection system

从图9可知,随着低反射率球形屏幕系统校准光源出射光强的增加,全景成像能量检测系统能量检测校准误差逐渐减小,因此全景成像能量检测系统对较高的能量有更高的检测准确度。

在检验全景成像能量检测系统内不同检测角度对能量检测校准误差的影响时,应避免低反射率球形屏幕系统校准光源出射光强的过高或过低对全景成像能量检测系统能量检测校准误差的影响,故选取低反射率球形屏幕系统校准光源出射光强为调节范围的50%时进行检验,其测试结果如图10所示。

从图10中可以看出,方位角不变,能量检测校准误差随着俯仰角的变大而增大,造成这种结果的原因主要是由于低反射率球形屏幕系统校准光源的发光特性为近似朗博特性,其发光强度的大小与出射角度相关。俯仰角不变,能量检测校准误差随方位角在 0° 到 180° 内逐渐增加,在 180° 至 360° 内减小,与定标系统空间关系校准误差的趋势一致。

4 定标系统定标结果验证

利用定标系统测量一块已知散射系数的标准散射体的散射系数,将定标系统测量出的标准散射体的散射系数与已知标准散射体的散射系数对比,以验证定标系统散射系数测量结果的准确性,进而验证定标系统校准方法的正确性。定标系统散射系数测量误差如图11所示。

从图11可以看出,俯仰角相同时,定标系统散射系数测量误差趋势与定标系统空间关系校准误差的趋势相似。方位角相同时,俯仰角从 0° 到 90° 变化,定标系统散射系数测量误差呈现先减小后增大的趋势,并在前向散射式能见度仪常用的工作散射角范围(20° 到 50°)内误差较小。最大定标系统散射系数测量误差为7.93%,满足定标系统散射系数测量误差不大于9%的要求,根据式(5)可知定标系统定标的标准散射体模拟的大气能见度的最大误差为8.61%,满足定标系统对标准散射体所模拟的能见度的定标偏差不大于10%的要求。因此经过用于校准能见度仪的标准散射体定标系统定标后的标准散射体满足用于校准能见度仪的标准散射体的使用要求。

5 结论

建立了一种用于校准前向散射式能见度仪的标准散射体定标系统,实现了同时对标准散射体不同散射角角度模拟的能见度准确定标。根据定标系统的组成与工作原理,提出了定标系统的校准方法并建立相应的校准链,制定了校准链中各步骤的校准方法并实验分析其中影响因子的变化对其自身校准结果的影响。通过对已知散射系数的标准散射体进行定标,验证校准后定标系统定标结果的准确性,进而验证了定标系统校准方法的正确性。实验结果表明:校准后高均匀性稳定照明系统的光强不稳定性为0.975%;定标系统的空间关系校准误差为 $40.2'$;全景成像能量检测系统能量检测偏差的误差为9.38%;定标系统对标准散射体的散射系数定标结果的误差为7.93%;定标系统所定标的标准散射体模拟的大气能见度的最大误差为8.61%,满足用于校准能见度仪的标准散射体的使用要求。

参考文献

[1] WANG Qing-mei, XIE Bang-li, MEI Pin-chen, *et al.* Discussing the theory and calibration of the forwardscatter metter

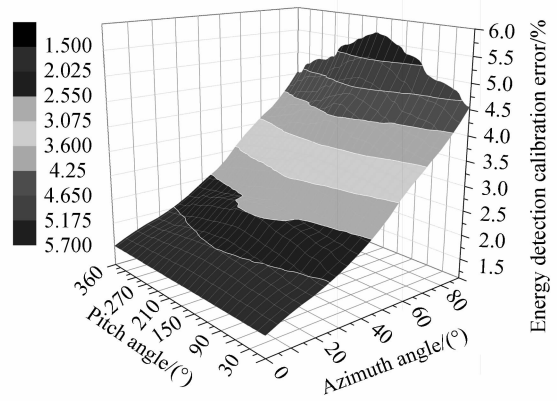


图10 全景成像能量检测系统检测角度对能量检测校准误差的影响

Fig. 10 The relationship between detection angle of panoramic imaging energy detection system and energy test calibration error

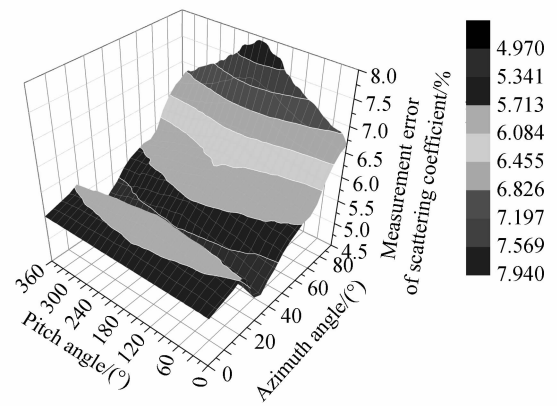


图11 定标系统散射系数测量误差

Fig. 11 The measurement error of scattering coefficient of the calibration system

- [J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instrument*, 2001(4): 10-16.
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(4):10-16.
- [2] ZHU Le-Kun, LI Lin. Calibration technology for forward scattering visibility meters[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2013, **41**(6): 1003-1007.
朱乐坤, 李林. 前向散射能见度仪校准技术[J]. 气象科技, 2013, **41**(6):1003-1007.
- [3] CHEN Yin. A calibration method of forward scattering type visibility meter: China, 103278478 A[P]. 2013-09-04.
程寅. 一种前向散射式能见度仪的标定方法:中国,103278478 A[P]. 2013-09-04.
- [4] WANG Mian, LIU Wen-qing, LU Yi-Huai, *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.
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.
- [5] BLOEMINK H I. KNMI visibility standard for calibration of scatterometers[C]. 4th ICEAWS International Conference on Experiences with Automatic Weather Stations, Lisboa, Portugal, 2006.
- [6] BARTELL F O, DERENIAK E L, WOLFE W L. The theory and measurement of bidirectional reflectance distribution function /BRDF/ and bidirectional transmittance distribution function /BTDF/[C]. SPIE, 1980, **257**: 154-160.
- [7] STUHLINGER T W, DERENIAK E L, BARTELL F O. Bidirectional reflectance distribution function of gold-plated sandpaper[J]. *Applied Optics*, 1981, **20**(15): 2648-55.
- [8] DAVIS L, KEPROS J G. Improved facility for BRDF/BTDF optical scatter measurements[C]. SPIE, 1986, **675**: 24-32.
- [9] CADY F M, STOVER J C, BJORK D R, *et al.* Design review of a multiwavelength, three-dimensional scatterometer [C]. San Diego - DL Tentative. International Society for Optics and Photonics, 1990.
- [10] DROLEN B L. Bidirectional reflectance and surface specularly results for a variety of spacecraft thermal control materials[C]. 26th Thermophysics Conference Honolulu, HI, USA, 1991.
- [11] MIETTINEN J, HARKONEN A K, PIRRONEN T H. Optical scattering measurement instrument for the design of machine vision illumination[C]. SPIE, 1992, **1614**: 45-56.
- [12] TSUCHIDA S, SATO I, OKADA S. Measurement of land surface BRDF with spatial instability for vicarious calibration[C]. Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites III. Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites III, 1999.
- [13] KLAASSEN T O, SMORENBURG K. Reflectance measurements on submillimeter absorbing coatings for HIFI[C]. SPIE, 2000, **4013**: 129-139.
- [14] DANA K J. BRDF/BTF measurement device[C]. Computer Vision, 2001. ICCV 2001. Proceedings. Eighth IEEE International Conference on. 2001:460-466 vol. 2.
- [15] WADMAN S, BAUMER S. Appearance characterization by a scatterometer employing a hemispherical screen[C]. SPIE, 2003, **5189**: 163-173.
- [16] CHEN Yin, LU Yi-huai, LIAN Cui-hua, *et al.* Investigation on the forward-scattering visibility sensor[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2006, **1**(4): 59-63.
程寅, 陆亦怀, 连翠华, 等. 前向散射型能见度仪的研制[J]. 大气与环境光学学报, 2006, **1**(4):59-63.
- [17] WANG Mian, LIU Wen-qing, LU Yi-Huai, *et al.* Research on applied measurement of fog and rain atmospheric extinction based on the forward scattering near infrared spectrum[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(8): 1776-1780.
王緬, 刘文清, 陆亦怀, 等. 基于前向近红外散射光谱测量雾和雨天大气消光的应用研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, **28**(8):1776-1780.
- [18] WANG Qi-wan. The design of the transmit and incept devices of the foreword scattering visibility meter[D]. Jilin University, 2005.
王启万. 前向散射式能见度仪的发射和接收装置设计[D]. 吉林大学, 2005.
- [19] YU Chun-xia. The design of the foreword scattering visibility meter based on ARM[D]. Ocean University of China, 2009.
于春霞. 基于 ARM 的前向散射式能见度仪的设计[D]. 中国海洋大学, 2009.
- [20] TAN Hao-bo, CHEN Huan-huan, WU Dui, *et al.* Performance evaluation and data correction of the forward scatter visibility instrument of Model6000[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2010, **26**(6): 687-693.
谭浩波, 陈欢欢, 吴兑, 等. Model6000 型前向散射能见度仪性能评估及数据订正[J]. 热带气象学报, 2010, **26**(6): 687-693.
- [21] MA Yuan. High — precision apparatus for visibility and present weather by british BIRALHSS[J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2005(2): 47-50.
马远. 英国 BIRAL HSS 高准确度能见度/天气现象仪[J]. 气象水文海洋仪器, 2005(2):47-50.
- [22] WANG Xiao-mo, NIE Li-li, DONG Ning. The use and maintenance of the forward scatter visibility instrument of PWD22[J]. *Journal of Shandong Meteorology*, 2010, **30**(4): 64-67.

- 王晓默, 聂丽丽, 董宁. PWD22 型能见度计的使用与维护[J]. 山东气象, 2010, **30**(4):64-67.
- [23] SUN Hui-lie. Review of visibility measurement instrument[J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instrument*, 1994(1): 32-40.
- 孙慧洁. 能见度测量仪器综述[J]. 气象水文海洋仪器, 1994(1):32-40.
- [24] 李春亮. 能见度测量技术 100 问[M]. 气象出版社, 2009.
- [25] WMO G. WMO guide to meteorological instruments and methods of observation. WMO-No. 8[M]. Secretariat of the World Meteorological Organization,1983,19-1.
- [26] 章澄昌. 大气气溶胶教程[M]. 气象出版社, 1995.
- [27] KAZOVSKY L G. Particle analysis using forward scattering data. [J]. *Applied Optics*, 1984, **23**(3): 448-454.
- [28] GERMOGENOVA O A, SIEGEL A. Intensity fluctuations in forward scattering and temporal coherence. [J]. *Applied Optics*, 1969, **8**(9): 1849-53.
- [29] MO Yue-qin, LIU Jun, LV Wen-hua, *et al.* The main performance analysis of principle prototype of forward scatter visibility instrument[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2004, **27**(2): 230-237.
- 莫月琴, 刘钧, 吕文华, 等. 前向散射型能见度仪原理样机的主要性能分析[J]. 南京气象学院学报, 2004, **27**(2):230-237.
- [30] 周秀骥. 高等大气物理学[M]. 气象出版社, 1991.
- [31] TAI Hong-da, ZHUANG Zi-bo, JIANG Li-hui, *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.
- [32] YU Rong-bin. Theory and technology research on particle testing based on the method of improved small angle of forward light scattering[D]. South China Normal University, 2002.
- 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]. 华南师范大学, 2002.
- [33] RYKOWSKI R, CHITTIM K, WADMAN S. Imaging sphere enables rapid source, intensity mapping[J]. *Photonics Spectra*, 2005, **39**(9): 64-69.
- [34] 国家气象局气候监测应用管理司. 气象仪器和观测方法指南[M]. 气象出版社, 1992.