

校准能见度仪用标准散射体定标系统装调技术*

张健¹, 张国玉^{1,2,3}, 孙高飞^{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:为了实现校准能见度仪用标准散射体的快速高精度定标,依据标准散射体校准前向散射式能见度仪的校准原理,提出了一种新型的校准能见度仪用标准散射体定标系统,重点研究了该系统的装调技术。根据定标系统的组成与工作原理,建立了定标系统装调光学模型,并提出由抛物面反射镜与全景成像能量检测系统相对位置装调以及抛物面反射镜与低反射率球形屏幕系统相对位置装调组成的定标系统装调方案。建立校准能见度仪用标准散射体定标系统极限误差计算模型,在入射光线角度为 45° 的情况下,计算出装调过程中抛物面反射镜与低反射率球形屏幕系统平移误差与倾斜误差的极限装调误差分别为 3.18° 和 0.847° ,抛物面反射镜与全景成像能量检测系统平移误差与倾斜误差的极限装调误差的极限装调误差均为2.14 pixel。实验证明装调后的校准能见度仪用标准散射体定标系统的最大角度检测误差为 0.795° ,满足定标系统的角分辨率是 1° 的使用要求。

关键词: 前向散射式能见度仪;定标系统;装调技术;极限误差;光轴一致性

中图分类号: TH765.8⁺3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Alignment technology for standard scatter plate calibration system used in calibrating forward scattering visibility meter

Zhang Jian¹, Zhang Guoyu^{1,2,3}, Sun Gaofei^{1,2,3}, Zhang Jianliang⁴

(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 realize rapid and high precision calibration of the standard scattering plate for visibility meter calibration, based on the calibration principle of standard scatter plate used in calibrating forward scattering visibility meter, we proposed a new type of calibration system for standard scatter plate used in calibrating forward scattering visibility meter. The main research focus was the alignment technology for the calibration system. According to composition and working principle of the calibration system, we established the alignment optical model. We also proposed the alignment scheme consist of the alignment of relative location between parabolic reflection mirror and panoramic imaging energy detection system and relative location between parabolic reflection mirror and low reflectivity spherical screen system. We established extremity error calculation model. In the situation of 45° pitching angle of incident light, we calculated the maximum alignment error of translation error and tilt error between parabolic reflection mirror and low reflectivity spherical screen system are 3.18° and 0.847° respectively, and the maximum alignment error of translation error and tilt error between parabolic reflection mirror and panoramic imaging energy detection system are both 2.14 pixels. The experimental results proved that the maximum angle detection error of the alignment standard scatter plate calibration system used in calibrating forward scattering visibility meter is 0.795° , which is less than 1° and satisfied the requirements of angle detection error of the calibration system.

Keywords: forward scattering visibility meter; calibration system; alignment technology; limit error; optical-axes boresight

1 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、交通及军事行动都有重要影响^[1]。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,由于前向散射式能见度仪具有安装简便、使用和维护方便等优点,因此目前前向散射式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测量仪的测量精度均作了相关研究。

黄新^[2]和肖韶荣等人^[3]提出了使用透镜和阶跃光纤组合的方式限制前向散射式能见度仪接收器的视场角,抑制了大部分外界杂散光对能见度测量结果的影响;赵静等人^[4]提出以大功率 LED 光源构建高精度前向散射式能见度仪发射系统,以提高前向散射式能见度仪测量准确性;李浩等人^[5]推导出了前向散射式能见度仪的探测方程,分析了前向散射式能见度仪的误差来源以及测量值的相对不确定度;王青梅等人^[6]提出一种利用标定好的前向散射式能见度仪制作多块标准板对前向散射式能见度仪进行现场标定的设想;朱乐坤等人^[7]提出了前向散射式能见度仪的实验室标定条件和方法,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;程寅等人^[8]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出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;王緬等人^[9]提出利用两块具有相同透射系数的漫透射板标定前向散射式能见度仪的方法;周向军等人^[10]和王胜杰等人^[11]等提出建立能够模拟不同能见度情况的实验室以实现前对前向散射式能见度仪的定标;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^[12],该方法分为 4 个步骤:1) 利用中性密度滤光片校准透射式能见度仪;2) 利用标准散射体校准前向散射式能见度仪;3) 将前两步校准后的透射式能见度仪和前向散射式能见度仪观测数据进行比较,判断步骤 2) 中使用的标准散射体的定标结果是否正确;4) 依据步骤 3) 的结果对步骤 2) 使用的标准散射体散射系数进行修正。这种对标准散射体的定标方法可以溯源至实验室标定的中性密度滤光片的透过率精度,现行的校准时间大约在 2~6 个月。

目前国内对前向散射式能见度仪精度提高的研究主要集中在通过对前向散射式能见度仪测量误差的分析,进而改进前向散射式能见度仪的相关部分或者是对前向

散射式能见度仪的定标方法进行相关研究。国内对前向散射式能见度仪定标方法中使用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,定标效率低,只能在室外进行校准等问题。因此本文提出了一种利用测量标准散射体散射系数从而实现对标标准散射体定标的新方法。建立了校准能见度仪用标准散射体定标系统,基于定标系统的工作原理提出了定标系统的装调方法,建立出定标系统装调极限误差计算模型,计算出定标系统装调极限误差,并通过实验证明定标系统的装调技术满足其使用要求。

2 定标系统组成与工作原理

2.1 前向散射式能见度仪工作原理

气象学上对能见度的定义是:标准视力的眼睛观察水平方向上,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^[13]。人们在能见度做出估计时,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,反映不以人的视觉而变化的大气的光学特征,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”^[14]。

根据 Koschmieder 定律^[15]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可以表示如式(1)所示。

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

式中: R_m 为气象能见距, ε 为视觉对比阈值, σ 为大气消光系数。

大气消光系数 σ 为散射系数 K_s 与吸收系数 K_a 之和,而大气粒子吸收效应远小于散射效应,可以忽略不计。按世界气象组织规定,由“气象光学视程”表示的大气能见度 V ,可以表示如式(2)所示。

$$V = \frac{-\ln \varepsilon}{K_s} \quad (2)$$

根据 Mie 散射理论^[16],得到大气粒子的散射角 θ 在 $20^\circ \sim 50^\circ$ 时,大气粒子散射光强度 $I(\theta)$ 与大气散射系数 K_s 和入射光强 I_0 之间存在线性关系^[17]如式(3)所示。

$$I(\theta) = K_s I_0 \quad (3)$$

前向散射式能见度仪即是根据式(3)测量出大气散射系数 K_s ,进而实现对大气能见度 V 的测量。校准能见度仪用标准散射体即是根据式(2)通过模拟不同的大气

散射系数 K_s 以实现对不同的大气能见度的模拟,从而实现向前向散射式能见度仪进行校准。

2.2 定标系统组成与工作原理

由式(2)和(3)可知,当视觉阈值 $\varepsilon = 0.05$ 时,大气粒子的散射角 θ 的散射光强度 $I(\theta)$ 和气象能见度 V 之间的关系如式(4)所示。

$$V = \frac{2.996I_0}{I(\theta)} = \frac{2.996}{I(\theta)/I_0} \quad (4)$$

根据式(4)可知,校准能见度仪用标准散射体定标系统只要测得标准散射体散射角 θ 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散射角 θ 所模拟的相应大气能见度的定标。

校准能见度仪用标准散射体定标系统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3部分组成^[18]。其组成如图1所示。

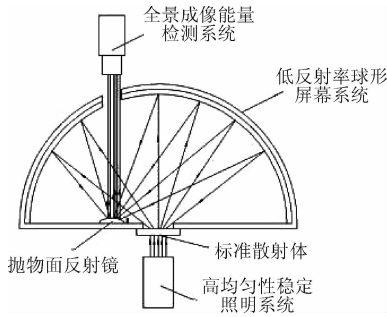


图1 系统组成
Fig. 1 System composition

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散射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经由标准散射体散射后的光场分布,利用抛物面反射镜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,通过对全景成像能量检测系统采集数据的处理即可得出标准散射体在各个角度的散射系数,进而计算出其所模拟的大气能见度,完成对标准散射体的定标。

2.3 定标系统装调光学模型

根据定标系统的组成可知,定标系统是应用离轴抛物面折反射全景成像光学系统实现对标准散射体的定标。由于离轴非球面光学元件的顶点曲率半径二次曲面系数以及离轴量等关键参数的公差要求严格,故需要建立定标系统装调光学模型,以便指导定标系统的高精度装调^[19-20]。定标系统的装调光学模型如图2所示。图2中 α_1 、 α_2 为入射光线1和2的入射角。

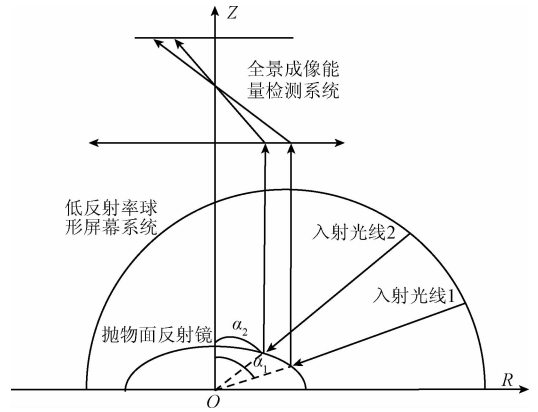


图2 定标系统装调光学模型
Fig. 2 Alignment optical model of calibration system

3 定标系统的装调方案

由图2可知,校准能见度仪用标准散射体定标系统主要需要对抛物面反射镜与全景成像能量检测系统相对位置以及抛物面反射镜与低反射率球形屏幕系统相对位置进行装调。抛物面反射镜与低反射率球形屏幕系统以及抛物面反射镜与全景成像能量检测系统之间均包含有平移误差和倾斜误差两种装调误差^[21]。

3.1 抛物面反射镜与低反射率球形屏幕系统装调

抛物面反射镜与低反射率球形屏幕系统装调过程中需要用到高平行度半反半透棱镜、高精度水平仪^[22]、高精度经纬仪^[23]、全景激光指向装调系统^[24]。同时,需要在低反射率球形屏幕系统安装基准面上标记有抛物面反射镜焦点的装调位置。全景激光指向装调系统可以绕抛物面反射镜理想光轴OZ旋转,旋转角 θ 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内精确可调,俯仰角 α 在 $20^\circ \sim 60^\circ$ 范围内精确可调。全景激光指向装调系统示意图如图3所示。

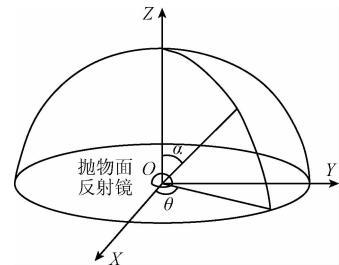


图3 全景激光指向装调系统
Fig. 3 Panoramic laser pointing alignment system

抛物面反射镜与低反射率球形屏幕系统装调步骤如下:

- 1) 利用高精度水平仪将半反半透棱镜与低反射率球形屏幕系统安装基准面调节平行,锁紧半反半透棱镜调

节机构,使其与低反射率球形屏幕系统安装基准面保持相对固定。

2) 利用经纬仪瞄准抛物面反射镜焦点的装调位置,记下此时经纬仪读数。

3) 调节低反射率球形屏幕系统安装基准面使经纬仪与半反半透棱镜形成自准直成像,并记录经纬仪读数。

4) 调整全景激光指向装调系统,使其出射的光线指向抛物面反射镜焦点的装调位置。

5) 用抛物面反射镜替换半反半透棱镜。

6) 调整抛物面反射镜的平移误差调节机构,记下此时经纬仪测得的全景激光指向装调系统发出的经过抛物面反射镜反射的光线的读数。

7) 在旋转角 θ 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内旋转全景激光指向装调系统,观测旋转 360° 过程中经纬仪观测的读数变化情况。如果读数变化超出平移误差极限装调误差,则重复步骤 6), 调节至全景激光指向装调系统旋转过程中经纬仪的读数变化范围在平移误差极限装调误差以内。

8) 调整抛物面反射镜的倾斜误差调节机构,使得经纬仪读出的全景激光指向装调系统发出的经过抛物面反射镜反射的光线的读数与步骤 3) 中经纬仪自准直时的读数的差值保持在倾斜误差极限装调误差以内。

9) 锁紧抛物面反射镜的平移误差和倾斜误差调节机构,完成抛物面反射镜与低反射率球形屏幕系统的装调。

其中步骤 1) ~ 5) 为建立抛物面反射镜与低反射率球形屏幕系统的装调基准,步骤 6) 、7) 为成抛物面反射镜与低反射率球形屏幕系统平移误差的装调,步骤 8) 为完成抛物面反射镜与低反射率球形屏幕系统倾斜误差的装调。

3.2 抛物面反射镜与全景成像能量检测系统装调

装调抛物面反射镜与全景成像能量检测系统的空间关系时,首先需要用高精度二维可调平行光管校准全景成像能量检测系统的角度检测精度。在完成抛物面反射镜与低反射率球形屏幕系统装调的基础上,完成抛物面反射镜与全景成像能量检测系统装调。装调步骤如下:

1) 将全景成像能量检测系统安装就位,并记下此时的全景激光指向装调系统发出的指向抛物面反射镜焦点的装调位置的光线的俯仰角度。

2) 调整全景成像能量检测系统的平移误差调节结构,在旋转角 θ 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内旋转全景激光指向装调系统,记录此时在全景成像能量检测系统的像面上不同旋转角 θ 所成像形成的圆形轨迹的位置信息。

3) 判断步骤 2) 中圆形轨迹的圆心与全景成像能量检测系统的像面中心点之间的距离误差是否小于平移误差极限装调误差,如不是,则重复步骤 2), 直至该误差小于平移误差极限装调误差为止。

4) 调整全景成像能量检测系统的倾斜误差调节结构,记录此时全景激光指向装调系统发出的经过抛物面

反射镜反射的光线在全景成像能量检测系统在像面的成像位置。

5) 判断步骤 4) 中的成像位置与步骤 1) 中记录的俯仰角度在理论像面成像位置的误差是否小于倾斜误差极限装调误差,如不是,则重复步骤 4), 直至该误差小于倾斜误差极限装调误差为止。

6) 锁紧全景成像能量检测系统的平移误差和倾斜误差调节机构,完成抛物面反射镜与全景成像能量检测系统的装调。

其中步骤 1) 为建立抛物面反射镜与全景成像能量检测系统的装调基准,步骤 2) ~ 3) 为抛物面反射镜与全景成像能量检测系统平移误差的装调,步骤 4) 、5) 为抛物面反射镜与全景成像能量检测系统倾斜误差的装调。

4 校准能见度仪用标准散射体定标系统极限装调误差计算

建立定标系统装调方案后,需要建立定标系统的极限装调误差计算模型,计算出装调过程中允许出现的极限装调误差,从而判别定标系统的装调是否正确。校准能见度仪用标准散射体定标系统的全景成像能量检测系统角度分辨率 $\gamma = 1^\circ$, 传感器尺寸为 $1\ 024\ \text{pixel} \times 1\ 024\ \text{pixel}$, 每个象元尺寸为 $5.5\ \mu\text{m}$, 像面大小为 $5.6\ \text{mm} \times 5.6\ \text{mm}$, 物高为 $25\ \text{mm}$, 物距为 $451.09\ \text{mm}$ 。低反射率球形屏幕系统内壁直径 $R = 360\ \text{mm}$ 。抛物面反射镜直径 $D_M = 25\ \text{mm}$, 高度 $h = 6.25\ \text{mm}$, 抛物面反射镜方程为:

$$r^2 = -25z + \frac{625}{4} \quad (5)$$

由于前向散射式能见度仪是基于 Mie 散射理论的能见度测量仪器,散射角为 θ 时 (θ 在 $20^\circ \sim 50^\circ$) 大气粒子的散射光强度与大气粒子散射系数和入射光强之间存在线性关系的能见度测量仪器。因此在装调时可以在全景激光指向装调系统俯仰角度 $\alpha = 45^\circ$ 时进行装调,因此,可以在此情况下计算定标系统极限装调误差。

4.1 抛物面反射镜与低反射率球形屏幕系统极限装调误差计算

根据抛物面反射镜与低反射率球形屏幕系统的装调步骤,需要利用极限误差法分别计算出抛物面反射镜与低反射率球形屏幕系统的极限平移误差与极限倾斜误差的极限装调误差。

4.1.1 平移误差极限装调误差计算

建立抛物面反射镜与低反射率球形屏幕系统极限平移误差计算模型如图 4 所示。图 4 中抛物面反射镜与低反射率球形屏幕系统极限平移误差为 D 。理想位置和实际位置抛物面反射镜的焦点分别为 O_0 、 O_1 。从低反射率球形屏幕系统上一点 M 点出射的理想入射光线与理想

位置抛物面反射镜交点为 P_0 , 相对于理想抛物面反射镜的入射角为 α_0 。从 M 点出射的实际入射光线与实际位置抛物面反射镜交点为 P_1 , 相对于实际位置抛物面反射镜的入射角为 α_1 。实际反射光线与理想位置抛物面交点为 P_2 , 平移误差入射光线相对于理想位置抛物面反射镜的入射角为 α_2 。

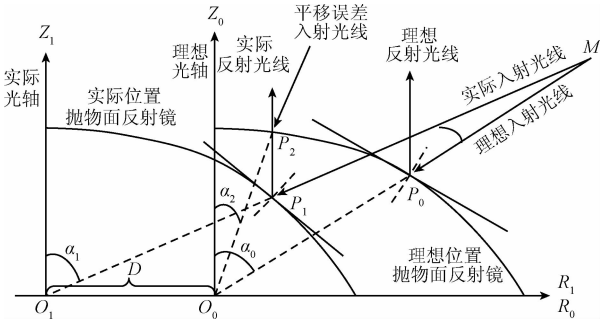


图4 极限平移误差计算模型

Fig. 4 Extremity translation error calculation model

由图4可知,极限平移误差 D 引起的校准能见度仪用标准散射体定标系统的角度检测误差 δ 如式(6)所示。

$$\delta = \alpha_0 - \alpha_2 \quad (6)$$

设点 M 在理想位置抛物面反射镜坐标系 $(O_0:R_0, Z_0)$ 中的坐标为 (R_M, Z_M) 。则有:

$$\tan(\alpha_0) = \frac{R_M}{Z_M} \quad (7)$$

$$\tan(\alpha_1) = \frac{R_M + D}{Z_M} \quad (8)$$

在实际位置抛物面反射镜坐标系 $(O_1:R_1, Z_1)$ 中,点 P_1 坐标为 (R_1, Z_1) , 有:

$$\tan(\alpha_1) = \frac{R_1}{Z_1} \quad (9)$$

在理想位置抛物面反射镜坐标系 $(O_0:R_0, Z_0)$ 中,点 P_2 坐标为 (R_2, Z_2) , 有:

$$R_2 = R_1 - D \quad (10)$$

$$\tan(\alpha_2) = \frac{R_2}{Z_2} \quad (11)$$

由式(5)~(11)可以得到:

$$\delta = \arctan \frac{R_M}{Z_M} -$$

$$\arctan \left(\frac{\frac{12.5Z_M \left(1 \pm \sqrt{1 + \left(\frac{R_M + D}{Z_M} \right)^2} \right)}{R_M + D} - D}{6.25 - \frac{\left(\frac{12.5Z_M \left(1 \pm \sqrt{1 + \left(\frac{R_M + D}{Z_M} \right)^2} \right)}{R_M + D} - D \right)^2}{25}} \right) \quad (12)$$

由于抛物面反射镜与低反射率球形屏幕系统之间有平移误差和倾斜误差两种,因此在计算极限平移误差时,可取 $\delta = 0.5^\circ$, 由式(12)可以计算出在全景激光指向装调系统俯仰角度 $\alpha = 45^\circ$ 时,极限平移误差 $D = 0.402 \text{ mm}$ 。

同时由式(5)可知,抛物面反射镜面型的切线斜率公式为:

$$z' = -\frac{2}{25}r \quad (13)$$

故由式(5)与(13),可以求得在极限平移误差 $D = 0.402 \text{ mm}$,全景激光指向装调系统俯仰角度 $\alpha = 45^\circ$ 时,抛物面反射镜与低反射率球形屏幕系统平移误差极限装调误差 $\eta = 3.18^\circ$ 。

4.1.2 极限倾斜误差极限装调误差计算

建立抛物面反射镜与低反射率球形屏幕系统极限倾斜误差计算模型如图5所示。

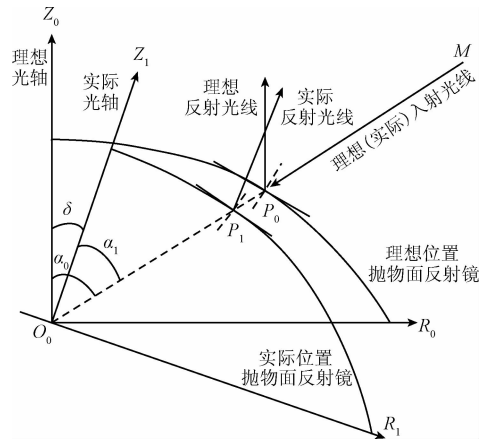


图5 极限倾斜误差计算模型

Fig. 5 Extremity tilt error calculation model

根据图5可知以及根据抛物面反射镜的光学特性可知,理想反射光线与实际反射光线分别与理想光轴和实际光轴平行,因此实际反射光线与理想反射光线之间的夹角与反射镜光轴倾斜角度 δ 相等。根据全景成像能量检测系统的光学特性可知,不同入射角的光线偏转相同角度在其像面上所带来的位置误差保持一致。同样由于抛物面反射镜与低反射率球形屏幕系统之间有平移误差和倾斜误差,因此在计算极限倾斜误差时,校准能见度仪用标准散射体定标系统的角度检测误差可取 $\delta = \alpha_1 - \alpha_0 = 0.5^\circ$ 。由式(5)和入射光线的角度 α 与 z 轴和 r 轴的关系,可得式(14)。

$$\begin{cases} r^2 = -25z + \frac{625}{4} \\ \frac{z}{r} = \cot\alpha \quad (0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ) \end{cases} \quad (14)$$

根据图2、式(14)及全景成像能量检测系统的物象关系,可以计算出在角度分辨率为0.5°时,全景成像能量检测系统像面极限分辨率 Δ 与入射光角度 α 的关系如图6所示。

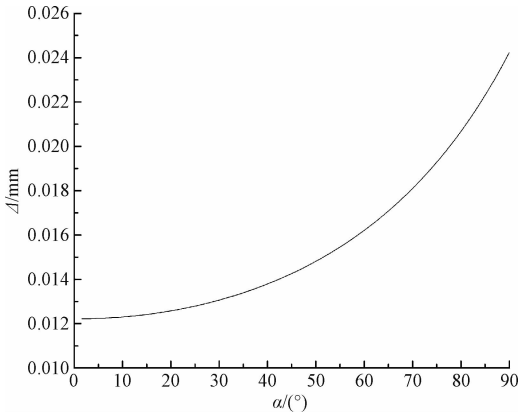


图6 全景成像能量检测系统像面极限分辨率与入射光角度的关系

Fig. 6 The relationship between image plane resolution of panoramic imaging energy detection system and the angle of incident light

此时全景成像能量检测系统像面的极限分辨率为0.012 mm。在全景激光指向装调系统俯仰角度 $\alpha = 45^\circ$ 时,根据全景成像能量检测系统的光学参数可以计算得出此时抛物面反射镜与低反射率球形屏幕系统极限倾斜误差极限装调误差 $\theta = 0.847^\circ$ 。

4.2 抛物面反射镜与全景成像能量检测系统极限装调误差计算

根据抛物面反射镜与全景成像能量检测系统装调步骤,需要利用极限误差法分别计算出抛物面反射镜与全景成像能量检测系统极限平移误差与极限倾斜误差的极限装调误差。

4.2.1 极限平移误差极限装调误差计算

建立抛物面反射镜与全景成像能量检测系统极限平移误差计算模型如图7所示。

根据图7可知,不同入射角度情况下,抛物面反射镜与全景成像能量检测系统极限平移误差 P 在全景成像能量检测系统像面上所带来的误差相同。同样由于抛物面反射镜与全景成像能量检测系统之间有平移误差和倾斜误差,因此在计算时,可取角度检测误差 $\delta = \alpha_1 - \alpha_0 = 0.5^\circ$ 。根据图6,式(14)以及根据全景成像能量检测系统的物象关系,可以计算出抛物面反射镜与全景成像能量检测系统极限平移误差 $P = 0.053$ mm,抛物面反射镜与全景成像能量检测系统极限平移误差极限装调误差 $T = 0.012$ mm,即2.14 pixel。

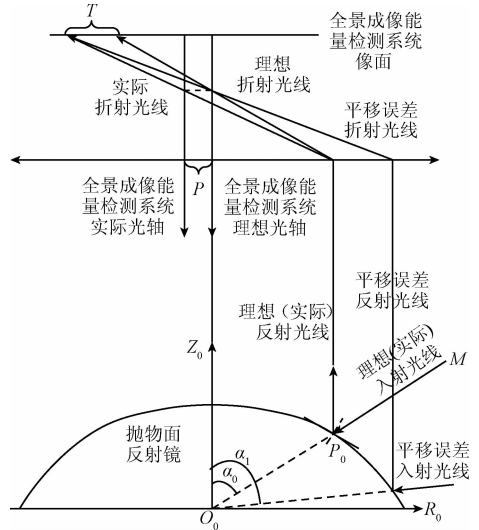


图7 极限平移误差计算模型

Fig. 7 Extremity translation error calculation model

4.2.2 极限倾斜误差极限装调误差计算

建立抛物面反射镜与全景成像能量检测系统极限倾斜误差计算模型如图8所示。

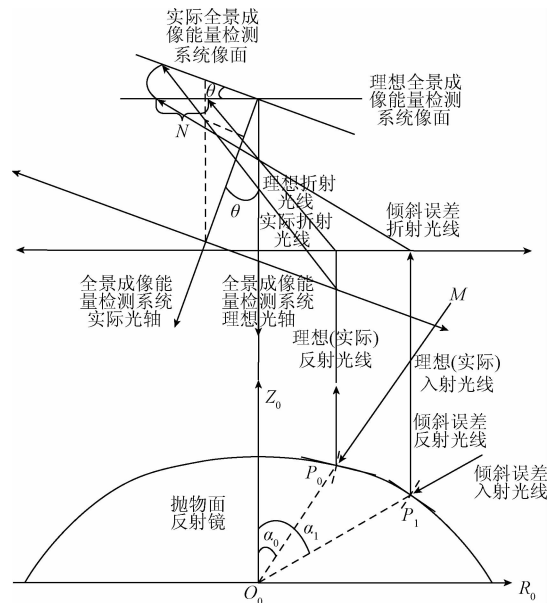


图8 极限倾斜误差计算模型

Fig. 8 Extremity tilt error calculation model

由图8可知,不同入射角度情况下,抛物面反射镜与全景成像能量检测系统极限倾斜误差 θ 在实际全景成像能量检测系统像面上所带来的误差相同。故不同入射光学角度情况,抛物面反射镜与全景成像能量检测系统极限倾斜误差 θ 在理论全景成像能量检测系统像面上所带来的误差相同。同样由于抛物面反射镜与全景成像能量检测系统之间有平移误差和倾斜误差,因此在计算时,角

度检测误差 $\delta = \alpha_1 - \alpha_0 = 0.5^\circ$ 。根据图6,式(14)以及根据全景成像能量检测系统的物象关系,可得此时抛物面反射镜与全景成像能量检测系统极限倾斜误差极限装调误差 $N = 0.012 \text{ mm}$,即 2.14 pixel 。

5 实验结果

根据定标系统的装调方案与计算出的极限装调误差,对定标系统进行装调。实际装调误差与对应极限装调误差如表1所示。

表1 实际装调误差与对应的极限装调误差表

Table 1 Actual alignment error and limit alignment error

装调误差名称	实际装调误差	极限装调误差
平移误差极限装调误差/(°)	1.35	3.18
倾斜误差极限装调误差/(°)	0.532	0.847
平移误差极限装调误差/pixel	1.58	2.14
倾斜误差极限装调误差/pixel	2.02	2.14

装调完成后,从 $20^\circ \sim 60^\circ$ 范围内间隔 5° 调节全景激光指向装调系统的俯仰角 α ,同时在不同俯仰角 α 的情况下,从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内以间隔 30° 旋转全景激光指向装调系统旋转角 θ ,以验证校准能见度仪用标准散射体定标系统的装调结果。校准能见度仪用标准散射体定标系统测得的全景激光指向装调系统入射角度与全景激光指向装调系统的实际角度误差如图9所示。其中定标系统的最大角度检测误差出现在俯仰角 $\alpha = 20^\circ$,方位角 $\theta = 240^\circ$ 时,定标系统的最大角度检测误差为 0.795° ,满足定标系统的角分辨率小于 1° 的使用要求。

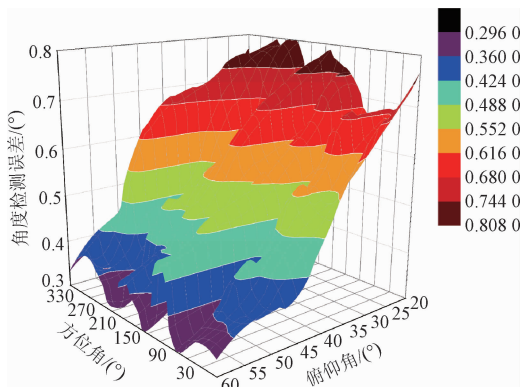


图9 装调后定标系统角度检测误差

Fig.9 The error of alignmented calibration system

6 结论

通过对前向散射式能见度仪的工作原理以及标准散

射体校准前向散射式能见度仪的校准原理进行分析,提出了一种通过测量标准散射体散射系数对其进行定标的校准能见度仪用标准散射体定标系统。基于校准能见度仪用标准散射体定标系统的组成与工作原理,建立的校准能见度仪用标准散射体定标系统装调光学模型,制定了校准能见度仪用标准散射体定标系统的装调方案。建立校准能见度仪用标准散射体定标系统极限误差计算模型,计算出装调过程中抛物面反射镜与低反射率球形屏幕系统平移误差与倾斜误差的极限装调误差分别为 3.18° 和 0.847° ,抛物面反射镜与全景成像能量检测系统平移误差与倾斜误差的极限装调误差的极限装调误差均为 2.14 pixel 。通过实验证明装调后的校准能见度仪用标准散射体定标系统的最大角度检测误差为 0.795° ,满足定标系统的角分辨率小于 1° 的使用要求。

参考文献

[1] 韩永,谢晨波,饶瑞中,等. 基于光散射技术的两种能见度探测方法的比较分析[J]. 红外与激光工程, 2006, 35(2):173-176.
 HAN Y, XIE CH B, RAO R ZH, et al. Comparison and analysis of two visibility detecting methods based on optical scatter technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(2):173-176.

[2] 黄新. 改善散射式能见度测量仪的不确定度研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2013.
 HANG X. Study of improving the uncertainly of the scattering visibility meter [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013.

[3] 肖韶荣,黄新,张周财,等. 散射能见度仪接收器视场角对测量的影响[J]. 现代雷达, 2015, 37(1):78-82.
 XIAO SH R, HUANG X, ZHANG ZH C. The effect of field angle of forward scattering visibility receiver on measurement[J]. Modern Radar, 2015, 37(1):78-82.

[4] 赵静,肖韶荣. 高精度能见度仪发射系统设计[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(33):9950-9953.
 ZHAO J, XIAO SH R. The design of high precision visibility meter launch system [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(33):9950-9953.

[5] 李浩,孙学金. 前向散射式能见度仪测量误差的理论分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6):1094-1098.
 LI H, SUN X J. Theoretical analysis on measurement error of forward scattering visibility meter [J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(6):1094-1098.

[6] 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.

- WANG Q M, XIE B L, MEI PI CH, et al. Discussing the theory and calibration of the forwardscatter meter[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instruments, 2001(4):10-16.
- [7] 朱乐坤, 李林. 前向散射式能见度仪校准技术[J]. 气象科技, 2013, 41(6):1003-1007.
- ZHU L L, LI L. Calibration techniques for forward scattering visibility meters [J]. Meteorological Science and Technology, 2013, 41(6):1003-1007.
- [8] 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.
- CHEN Y. A calibration method of forward scattering type visibility meter: China, 103278478 A[P]. 2013-09-04.
- [9] 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.
- [10] 周向军, 杨恒祥, 张正. 烟雾实验室-能见度仪标校实验场初探[C]. 中国科协年会, 2010:1-6.
- ZHOU X J, YANG H X, ZHANG ZH. Smog laboratory-exploration of the laboratory of visibility instrument calibration[C]. The annual meeting of China Association for Science and Technology, 2010:1-6.
- [11] 王胜杰, 褚进华, 解淑艳. 能见度仪检测实验室建设的探讨[J]. 环境监控与预警, 2015, 7(6):63-67.
- WANG SH J, CHU J H, XIE SH Y. Discussion on examining the laboratory construction using a visibility meter[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2015, 7(6):63-67.
- [12] BLOEMINK H I. KNMI visibility standard for calibration of scatterometers [C]. 4th ICEAWS International Conference on Experiences with Automatic Weather Stations, 2006.
- [13] 李春亮. 能见度测量技术 100 问[M]. 北京:气象出版社, 2009.
- LI CH L. Hundred questions of visibility measurement technique [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009.
- [14] WMO G E. WMO Guide to meteorological instruments and methods of observation [M]. Chairperson: Secretariat of the World Meteorological Organization, 1983.
- [15] 章澄昌. 大气气溶胶教程[M]. 北京:气象出版社, 1995.
- ZHANG CH CH. A course of atmospheric aerosol[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1995.
- [16] 周秀骥. 高等大气物理学[M]. 北京:气象出版社, 1991.
- ZHOU X J. Advanced atmospheric physics [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991.
- [17] 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. A research on testing theory and technology improving forward direction light scattering of small angle[D]. Guangzhou: South China Normal University, 2002.
- [18] RYKOWSKI R, CHITTIM K, WADMAN S. Imaging sphere enables rapid source, intensity mapping [J]. Photonics Spectra, 2005, 39 9 :64-69.
- [19] 苗健宇, 张立平, 田铁印, 等. 三线阵 CCD 立体测绘相机结构实现技术 [J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(10):2183-2189.
- MIAO J Y, ZHANG L P, TIAN T Y, er al. Realizable technology of light-machine structure for three-line array CCD tridimensional mapping camera [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32 (10): 2183-2189.
- [20] 李俊峰, 宣斌. 离轴非球面零位补偿检验的三坐标装调技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(11):1073-1079.
- LI J F, XUAN B. Alignment of off-axis aspheric mirror using three-coordinate measuring in null testing [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(11):1073-1079.
- [21] 陈钦芳, 徐昌杰, 王青松. 抛物面反射镜光轴的确定[J]. 应用光学, 2008, 29(2):225-229.
- CHEN Q F, XU CH J, WANG Q S. Alignment for optical axis of parabolic mirror[J]. Journal of Applied Optics, 2008, 29(2):225-229.
- [22] 鲁云峰, 贺青, 曾涛, 等. 基于高精度电子水平仪的平面镜水平调整方法[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(4):744-750.
- LU Y F, HE Q, ZENG T, et al. High precision electronic level meter based plane mirror horizontal adjustment method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(4):744-750.
- [23] 郑茹, 张国玉, 张健, 等. 基于月球真实辐射亮度的月球模拟器光学系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(9):2116-2122.

ZHENG R, ZHANG G Y, ZHANG J, et al. Optical system design of the moon simulator based on real moon radiance[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(9):2116-2122.

- [24] 安源, 钟兴, 贾学志, 等. 单光源高精度正交十字形激光标定装置设计[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(3):691-697.

AN Y, ZHONG X, JIA X ZH, et al. Design of high precision orthogonal cross laser demarcation device with single laser[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(3):691-697.

作者简介



张健, 2012年于长春理工大学大学获得学士学位, 现为长春理工大学在读博士研究生, 主要研究方向为气象仪器设计、光电仪器与检测技术等方面研究。

E-mail: zhangjian_nr@126.com

Zhang Jian received his B. Sc. Degree from Changchun University of Science and Technology (CUST) in 2012. Now he is a Ph. D. Candidate in CUST. His main research interests include meteorological instrument design, photoelectric instrument and measurement technique etc.



张国玉, 2005年于长春理工大学获得博士学位, 现为长春理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为空间科学与技术、光电仪器与检测技术等方面的研究工作。

E-mail: zh_guoyu@163.com

Zhang Guoyu received his Ph. D. degree from Changchun University of Science and Technology (CUST) in 2005. He is currently a professor and Ph. D supervisor in CUST. His main research interests include space science and technology, photoelectric instrument and measurement technique etc.