

文章编号: 1002-2082 (2024) 01-0206-09

基于激光振镜的高稳定辐照度定标光源

林雨辰^{1,2}, 董航^{1,2}, 叶新¹, 费义艳³, 张程睿³, 方伟¹, 衣小龙¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 复旦大学信息科学与工程学院光科学与工程系, 上海 200433)

摘要: 获取高均匀性、高稳定性的光源是太阳绝对辐射计辐射照度定标的关键技术, 实验室现有光源无法同时满足均匀性与稳定性。因此, 该文提出通过振镜扫描的方式来获取高均匀、高稳定的面光源方案。首先, 建立二维激光扫描模型, 设计以快速扫描振镜和离轴抛物面镜为核心的光学系统; 其次, 根据振镜扫描系统建立驱动, 开发控制软件, 设计三种扫描路径; 最后, 选取合适的扫描路径进行实验验证, 并开展其均匀性、稳定性等方面的测试。实验结果表明: 振镜扫描光斑的不均匀性优于 $\pm 1\%$, 发散角小于 $\pm 0.26^\circ$, 光源稳定性优于 0.02% 。验证了激光振镜扫描光源可作为绝对辐射计辐照度定标光源的可行性, 为实现高精度太阳辐照度定标提供关键技术支撑及实验依据。

关键词: 太阳绝对辐射计; 振镜扫描; 离轴准直; 高均匀性; 高稳定性

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0107002

Highly-stable solar irradiance calibration light source based on laser galvanometer

LIN Yuchen^{1,2}, DONG Hang^{1,2}, YE Xin¹, FEI Yiyan³, ZHANG Chengrui³, FANG Wei¹, YI Xiaolong¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Department of Optical Science and Engineering, School of Information Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Obtaining the light source with high uniformity and high stability is the key technology for the radiometric calibration of solar absolute radiometer. The existing light source in the laboratory cannot meet the uniformity and stability at the same time. Therefore, it was proposed to obtain a highly uniform and stable surface light source through galvanometer scanning. Firstly, the two-dimensional laser scanning mode was established, and the optical system with fast scanning galvanometer and off-axis mirror as the core was designed. Secondly, according to the galvanometer scanning system, the driver was established, the control software was developed, and three scanning paths were designed. Finally, the appropriate scanning path was selected for experimental verification and its uniformity and stability was tested. The experimental results show that the non-uniformity of the scanning spot of the galvanometer is better than $\pm 1\%$, the divergence angle is less than $\pm 0.26^\circ$, and the stability of the light source is better than 0.02% . The feasibility of the laser galvanometer scanning light source as the irradiance calibration light source of the absolute radiometer is verified, which provides key technical support and experimental basis for achieving high-precision solar irradiance calibration.

收稿日期: 2023-03-23; 修回日期: 2023-10-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (42001316); 国家重点研发计划 (2022YFB3903200; 2022YFB3903203); 国家自然科学基金 (32271510); 上海自然科学基金 (20ZR1403700); 吉林省自然科学基金 (20220101165JC); 长春光机所-复旦大学合作基金 (FC2020-004)

作者简介: 林雨辰 (1996—), 男, 博士研究生, 主要从事辐射计量等研究。E-mail: 945700739@qq.com

通信作者: 衣小龙 (1988—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事空间低温辐射计、总辐照度定标研究。E-mail: yxl19880603@126.com

Key words: solar absolute radiometer; galvanometer scanning; off-axis alignment; high uniformity; high stability

引言

太阳是地球唯一外部能量输入源,是生态系统形成、发展及变化的驱动力^[1]。太阳总辐射照度(total solar irradiance, TSI)是地球气候模型的关键参量之一,长期精准监测空间 TSI 可为气候变化预测、环保政策制定提供科学依据^[2]。地球辐射能量不平衡真值是揭开气候变暖诸多因素的内在关系和量化预测气候变化趋势至关重要的因素。为了地球辐射能量不平衡真值,世界各国科学家开展了大量的理论和数据分析得到不平衡量约 $0.6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,因此太阳辐射测量不确定度必须优于 0.03% ,才能满足地球能量不平衡真值的掌握预测,量化研究影响气候变化的诸多因素^[3]。

欧美及我国自 1978 年开展空间 TSI 观测实验,建立 40 余年空间 TSI 观测序列,不仅获得了太阳常数,也揭示了不同时间尺度的 TSI 变化规律,测量数据一致性达到 0.3% ^[4],但依然无法满足气候变化研究领域的精度需求。

为实现高精度 TSI 测量,一方面要提升仪器研制水平,另一方面要提升 TSI 定标精度^[5]。目前我国 TSI 定标采用的是外场定标方法,受世界辐射基准不确定度、地基太阳辐射稳定性、真空空气不等效性等影响,定标不确定度难以突破 0.2% 。因此我国开展了溯源至低温辐射计的 TSI 定标技术研究^[6],将 TSI 定标不确定度改善至 0.03% 。低温辐射计是世界公认的光辐射计量初级标准^[7],以低温辐射计为基准源,可以解决传统定标方法中基准源绝对精度低的问题^[8]。在真空环境下,通过 Y 型共光路测量装置^[9],低温辐射计与太阳辐射计利用一维位移分时测量同一辐照度定标光源,可以缩短定标链路,消除真空空气不等效、窗口透过率等影响。辐照度定标光源应分别覆盖低温辐射计和太阳辐射计入瞳,辐照度需达到一个太阳常数,稳定性需优于 0.02% ,空间均匀性优于 $\pm 1\%$,实验室现有光源难以达到以上指标。单色激光光源具备方向性好、功率稳定、亮度高等优点,广泛应用于辐射定标领域^[10-11]。但激光截面振幅分布遵守高斯函数,简单通过扩束获得的面光源空间均匀性差,因此亟需研究一种可实现高均匀性、高稳定性辐照度定标光源的获取方法^[12]。

本文提出了通过振镜扫描的方式来获取高均

匀、高稳定的面光源方案,建立基于激光快速扫描的光源模拟仿真模型,设计以快速扫描振镜和准直镜头为核心的光学系统,建立空间均匀、功率稳定的辐照度定标光源;设计辐照度定标光源空间均匀性、稳定性检测方法,开展检测实验。

1 基于激光振镜的高斯光束叠加原理

1.1 均匀照度光源区域的形成

辐照度定标光源为面光源,并覆盖辐射计入瞳。假设激光沿 $+z$ 方向传播,由激光器发出的光束,其振幅分布函数是 1 个高斯函数,如图 1 所示。 z 位置截面内的振幅分布 A 可以通过式(1)计算:

$$A = A_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} e^{-\frac{x^2+y^2}{\omega^2(z)}} \quad (1)$$

式中: $\omega(z)$ 为 z 位置的光斑半径; ω_0 为束腰半径; A_0 为最大振幅; x 和 y 为截面内位置坐标。扩束的激光振幅依然属于高斯分布,空间均匀性差,不能作为辐照度定标光源。

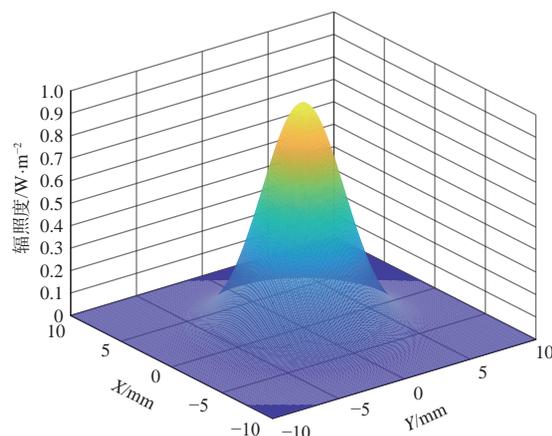


图 1 高斯光束振幅分布图

Fig. 1 Distribution diagram of Gaussian beam amplitude

激光扫描面积为 S 的区域,通过高斯光束叠加将激光扩展为面光源,可以同时满足稳定性和空间均匀性要求。对高斯函数在 x 、 y 方向上以固定间距进行叠加,仿真效果图如图 2 所示。可见在高斯函数的叠加中心区域将形成 1 个均匀区域。面光源的辐照度 I_s 可以通过振幅分布的积分得到:

$$I_s = \frac{1}{S} \iint_S \left[A_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} e^{-\frac{x^2+y^2}{\omega^2(z)}} \right]^2 dx dy \quad (2)$$

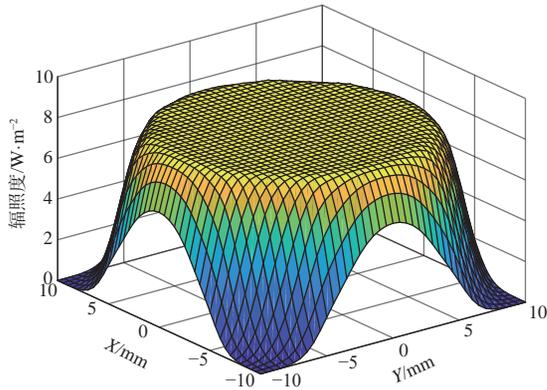


图2 高斯光束叠加图

Fig. 2 Superposition diagram of Gaussian beam

为获取均匀的面光源,理论上可通过组合叠加完全相同的高斯激光束实现,但实际上即使选用参数相同的激光器,其出射的高斯光束也是不尽相同的。此外,以较小间距叠加上百台激光器成本较高,在工程上也难以实现。

由于实际因素的影响,本文选用快速扫描振镜以获取辐照度定标光源。快速扫描振镜采用光机扫描方式,通过机械装置带动反射光束的偏转,实现激光光束在工作范围内移动。其机械部分是由X、Y共2个扫描头组成的光束偏转器,光束偏转器安装微小反射镜片,通过打标程序控制改变反射角度,使光束在工作范围内快速移动,并通过准直镜调整发散角。鉴于扫描速度快、扫描方式可控、扫描分辨率高等优势,伴随驱动设计、打标算法、图形校正等技术发展,快速扫描振镜广泛应用于光学检测、雷达探测、激光加工等领域。激光步进距离为 Δx 和 Δy ,扫描示意图如图3所示。快速扫描振镜可实现对单束激光高斯光束的多次叠加,形成大面积的均匀光源,因此本文将基于激光快速扫描的方式,建立辐照度定标光源。

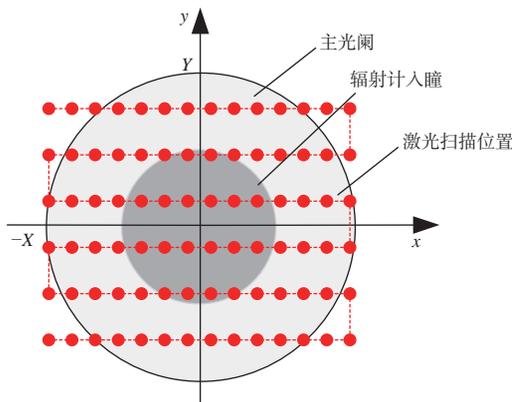


图3 快速扫描振镜扫描示意图

Fig. 3 Scanning schematic diagram of fast scanning galvanometer

1.2 光学系统设计

首先使激光光源通过振镜系统,通过二维扫描实现高斯光束叠加,形成均匀辐照度场。依次经过x振镜与y振镜扫描后变为发散的面光源,再由准直系统进行准直输出,得到辐射光源。为使振镜系统可用于不同谱段的辐射定标,得到探测器在不同波长下的响应度,准直系统选用离轴抛物面镜以消除色差的影响。理论上,振镜输出的全部光线通过离轴抛物面镜的焦点才能形成互相平行的光束,但由于二维扫描振镜无法做到定心扫描,有一部分光无法通过焦点,不能做到完全平行。因此需对光学系统进行分析,以确保发散角满足参数需求。

在x面内,如图4所示,假设y振镜不动,x振镜转动,使激光扫描一维区域,y振镜上的反射点构成1条直线,在离轴抛物面镜上的反射点也构成1条直线。激光通过x振镜的偏折,光束上边缘与下边缘的反向延长线汇聚于点X'(x振镜反射位置的镜像点)。因此,对于x振镜,最小空间通光口径的位置在X'处。

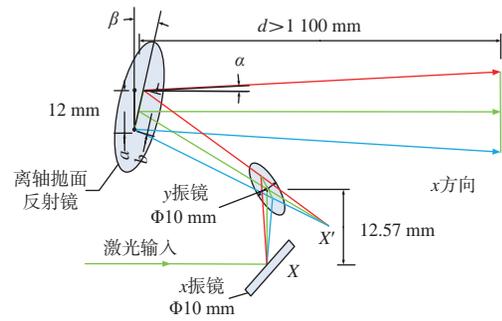


图4 x面内光路图

Fig. 4 x-sided optical path diagram

在y面内,如图5所示,x振镜的一维反射光在y振镜面上的反射点等效于1个新的线光源,线光

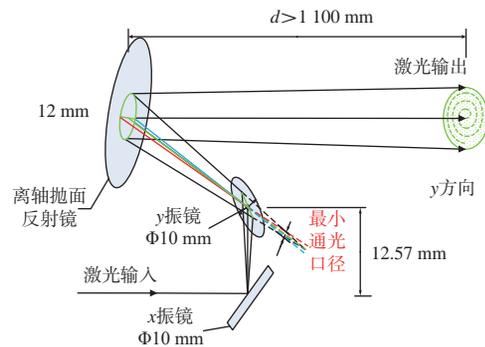


图5 y面内光路图

Fig. 5 y-sided optical path diagram

源的两个端点不需要y振镜转动。在线光源中心点位置, y振镜的摆动角度最大, 从而保证扫描到面光源边缘, 光束左边缘与右边缘的反向延长线是发散的^[13-14]。该反向发散延长线与反向汇聚延长线构成最小的空间尺寸, 当最小通光口径位于离轴抛物面反射镜焦点处时, 即可获取发散角最小的输出光束^[15]。

1.3 建模优化

采用常规振镜, 其基本结构如图6所示, 振镜有效通光口径为10 mm, x、y振镜间距为12.57 mm, 光斑直径取 $c=3$ mm, 计算x、y振镜合适的转角范围。

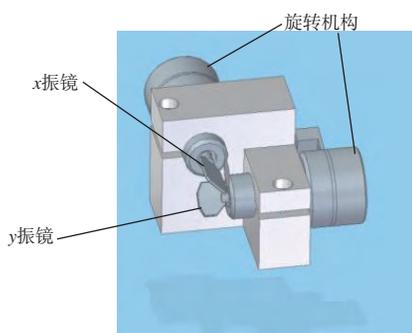


图6 振镜几何结构图

Fig. 6 Geometric structure diagram of galvanometer

首先对于x振镜, 如图7所示, 振镜有效通光口径为10 mm, 激光在x振镜上的照射长度 d 可通过式(3)计算:

$$d = \frac{c}{\sin \gamma} \quad (3)$$

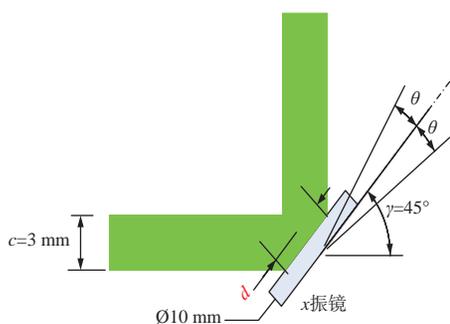


图7 x振镜结构图

Fig. 7 Structure diagram of x galvanometer

假设 γ 的初始角度为 45° , $d_0=4.24$ mm。使x振镜留出0.5 mm的余量, 则 d 的最大值为4.5 mm, γ 的最小值为 42° , 因此, x振镜的转动角度范围为 $\pm 3^\circ$, 即最大可以提供 $\pm 3^\circ$ 的光束偏转。同样, y振镜的最大转动角度也是 $\pm 3^\circ$ 。

再考虑y振镜, 如图8所示, 由于x振镜和y振镜

的间距为12.57 mm, x振镜最大转动角度 θ 的反射光线在y振镜的投影距离为

$$e = 2 \times l \times \tan(\theta) \quad (4)$$

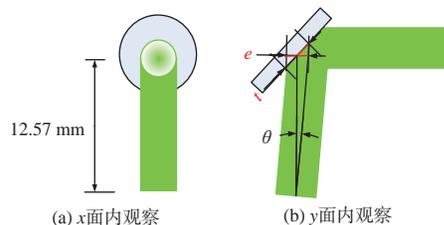


图8 y振镜结构图

Fig. 8 Structure diagram of y galvanometer

根据(4)式可求得 $e=1.32$ mm, 对应y振镜上的实际距离 t 为1.862 mm。考虑光束直径, y振镜上的扫描范围为4.862 mm, 小于振镜的尺寸, 满足设计需求。

由于振镜扫描的输出光源为发散的, 因此在振镜后边加入离轴抛物面镜作为准直系统来约束发散角^[16-17]。令振镜出射光在离轴抛物面镜上的入射角为 30° , 因此需要离轴角度 30° 。焦距、焦点位置的计算如下。

如图9所示, 在x面内, 通过前面的计算, 得到最大偏转角为 $\theta=\pm 3^\circ$ 。由于y振镜与离轴抛物面镜的距离更近, y振镜的偏转角度 φ 应大于 θ 。假设离轴抛物面镜的焦距为 f , 最小通光尺寸位于距离x振镜的 m 处。当 $\theta=3^\circ$ 时, 取离轴抛物面镜处光源直径为 a , 在离轴抛物面镜上的入射角为 β , 则离轴抛物面镜上的反射长度 b 为

$$b = a / \cos(\beta) \quad (5)$$

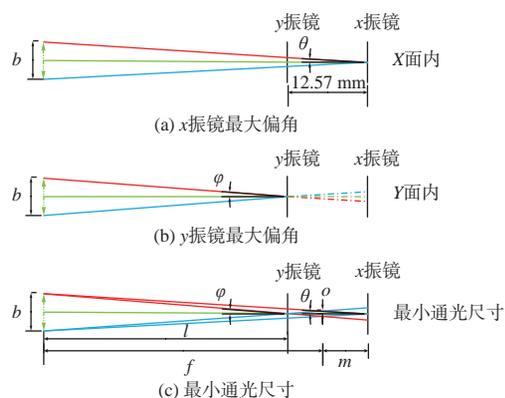


图9 x、y振镜最大偏角示意图

Fig. 9 Schematic diagram of maximum deflection angle of x and y galvanometer

离轴抛物面镜与x振镜的间距可通过式(6)计算:

$$z = f + m = \frac{b/2}{\tan(\theta)} \quad (6)$$

由几何关系可知:

$$\varphi = \arctan(b/2l) \tag{7}$$

焦点位置 m 可由式(8)计算得到:

$$m \tan(\theta) = (z-l) \tan(\varphi) \tag{8}$$

计算得到焦点位置 m 的值,进而得到离轴抛物面镜焦距 f ,再计算最小通光尺寸:

$$o = m \times \tan(\theta) \tag{9}$$

根据这2个参数,可得到发散角为

$$\alpha = \arctan(o/f) \tag{10}$$

根据上述计算方法,可通过 x 振镜偏转角 θ 、光源直径、 x 和 y 振镜间距、离轴抛物面镜偏离角 β ,计算离轴抛物面镜焦距 f 、焦点位置 m 、 y 振镜偏转角度 φ 、发散角 α 等参数。设置一系列 x 振镜的偏转角度,得到相应的参数如图10所示。

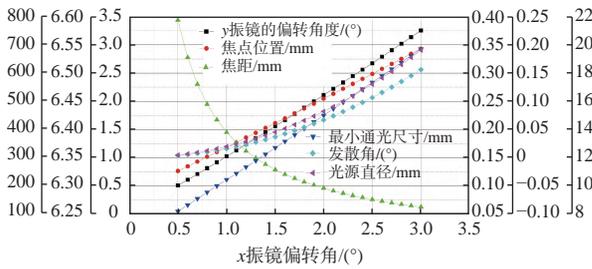


图10 各参数与 x 振镜偏转角度的关系

Fig. 10 Relationship between each parameter and deflection angle of x galvanometer

由图10可知,当 $0.5^\circ < \theta < 3.0^\circ$ 、且 $\beta = 30^\circ$ 时, y 振镜偏转角度 $0.5^\circ < \varphi < 3.26^\circ$,离轴抛物面镜焦距 $125.7 \text{ mm} < f < 787.84 \text{ mm}$,焦点位置 $6.54 \text{ mm} < m < 6.32 \text{ mm}$,发散角 $0.004 \text{ } 015^\circ < \alpha < 0.156 \text{ } 300^\circ$ 。

根据现有产品,最终确定辐照度定标光源采用的振镜以及离轴抛物面镜参数如下:

- 1) 标准振镜,通光口径10 mm,间距12.57 mm, x 振镜偏转角度 $\theta = \pm 1.192^\circ$, y 振镜偏转角度 $\varphi = \pm 1.23^\circ$;
- 2) 离轴抛物面镜,离轴角 30° ,焦距326.69 mm,口径76 mm。

2 实验结果与分析

2.1 光源建立

依照上文所述选取合适的光学元件,搭建振镜光源的光学系统,整体实物图如图11所示。

激光进入振镜系统前,需对光源的稳定性进行测试,采用经国家计量院低温辐射基准定标的陷阱探测器对入射光的稳定性进行监视。光源1 h内信号值如图12所示。

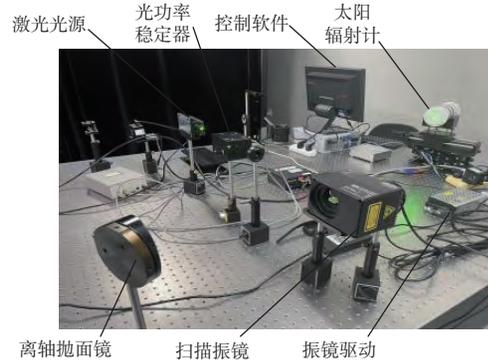


图11 太阳辐照度模拟光源实物图

Fig. 11 Physical drawing of solar irradiance simulation light source

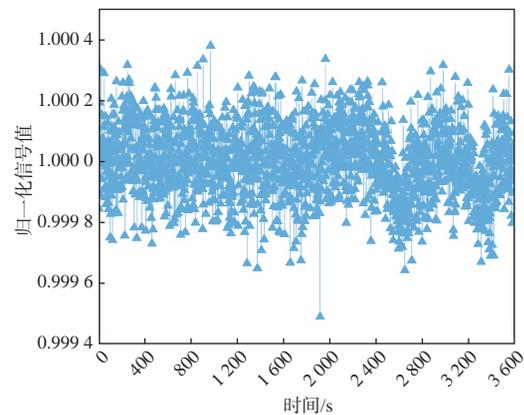


图12 1 h内激光稳定性

Fig. 12 Laser stability within 1 hour

以电压信号的相对标准差评估光源稳定性,计算得到参考光1 h内不稳定性为0.012%,可知激光光源自身稳定性良好。

振镜系统采用3种扫描路径,分别为同心圆扫描、螺旋线扫描与蛇形扫描方式。扫描界面如图13所示。

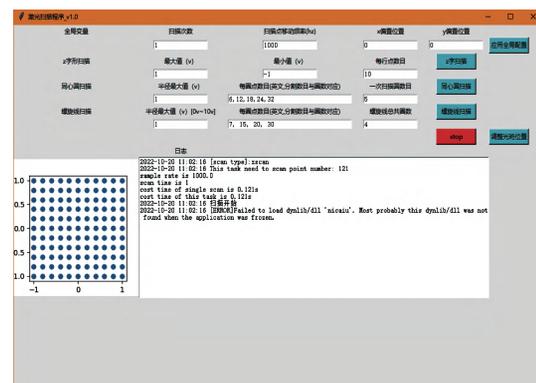


图13 软件界面

Fig. 13 Interface of software

通过 CCD 相机获取 3 种振镜输出的扫描面

光源, 比较 3 种扫描方式后选取最优扫描方式进行实验。

1) 同心圆扫描

同心圆扫描是从最中心点开始, 每次向外推进 1 个圆环, 直到扫描完最大半径的圆, 其扫描图样为圆形。CCD 相机拍摄图样如图 14 所示。

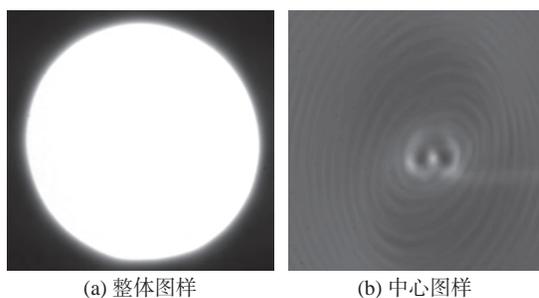


图 14 同心圆形状的扫描图样

Fig. 14 Scanning pattern in shape of concentric circle

通过图 14 可以清晰看到, 振镜以同心圆方式进行扫描时, 由于工作过程中的高速振动, 会导致圆心部分呈现一个突出的亮斑, 严重影响了光斑整体均匀性。

2) 螺旋线扫描

螺旋线扫描同样是从中心点开始, 以中心点为圆心, 每个点的半径依次向外推进直到整幅图扫描完毕, 螺旋线扫描图样同样为圆形^[18]。CCD 相机拍摄图样如图 15 所示。

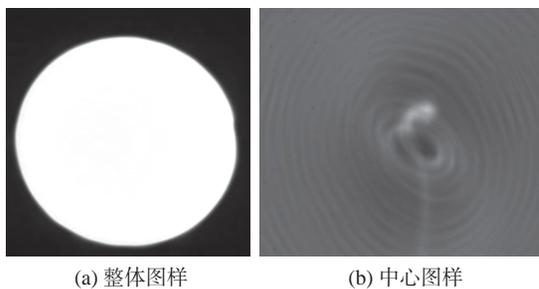


图 15 螺旋线扫描图样

Fig. 15 Scanning pattern in shape of helix

可见螺旋线扫描方式下光斑的中心处与同心圆扫描时类似, 中心由于振镜的高速振动扫描出不规则的形状, 使光斑均匀性降低。

3) 蛇形扫描

蛇形扫描是从左上向右扫描 1 行, 扫描完 1 行后以蛇形进行下 1 行的扫描, 以此类推直到这幅图扫描完, 扫描得到的光斑形状为方形。选择合适的曝光时间, CCD 相机获取的图像如图 16 所示。

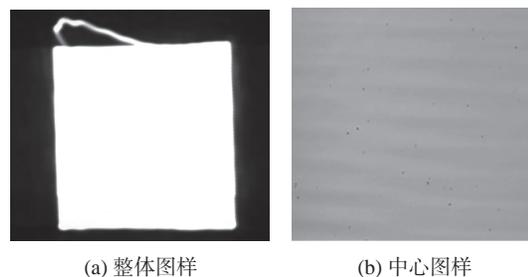


图 16 蛇形扫描图样

Fig. 16 Scanning pattern in shape of serpentine

根据拍摄的图片以及蛇形扫描方式可知, 当 1 副图扫描完成后, 光斑会从扫描的最后 1 点返回左上角重新开始第 2 次扫描, 这将导致振镜在高频率下连续振动时, 由于惯性的存在产生一定量的超调, 在光斑边缘处产生不规则形状。虽然蛇形扫描方式使边缘位置不规则, 但实际操作通常选择中心光斑区域进行实验。比较 3 种扫描方式可知, 蛇形扫描方式由于是同心圆扫描与螺旋线扫描, 因此本文采取蛇形扫描方式进行实验。

2.2 测试结果

1) 均匀性评估

太阳辐射计的主光阑尺寸为 5 mm, CCD 相机尺寸为 10 mm×12.5 mm, 振镜扫描出射的方形光斑边长为 20 mm, 可完全覆盖 CCD 的接收面以及辐射计的主光阑, 对图 16(b) 中图样进行均匀性评估。如图 17 所示, 将 CCD 获取图样进行 9 等分^[19], 对各区域的灰度值加和作为该区域总照度值, 并通过(11)式对其不均匀性进行评估:

$$\xi = \frac{\max(E) - \min(E)}{\max(E) + \min(E)} \quad (11)$$

E1	E2	E3
E4	E5	E6
E7	E8	E9

图 17 不均匀性评估方法

Fig. 17 Nonuniformity assessment methods

计算得到 9 个区域的信号值如表 1 所示。最终测得输出光斑的不均匀性为 $\pm 0.87\%$, 可认为在 $\Phi 10$ mm 内光斑不均匀性优于 $\pm 1\%$ 。

2) 发散角测试

通过 CCD 相机在不同位置拍摄光斑图像, 再由 Matlab 编写程序来计算每幅图像亮点的像素个

表1 光斑不均匀性测试数据

Table 1 Test data of spot nonuniformity

区域	信号值(DN)
1	156 680.99
2	156 316.47
3	154 352.91
4	156 778.59
5	157 050.30
6	155 495.04
7	156 448.77
8	156 295.26
9	155 336.07

数 N , 乘以每个像元面积 s 即为光斑面积 S 。利用矩形面积公式可得到移动 CCD 前后光斑边长变化。

$$a = \sqrt{S} \quad (12)$$

设 CCD 相机移动间距为 d , 则发散角为

$$\theta = \arctan\left(\frac{a_1 - a_2}{2d}\right) \pm \arctan\left(\frac{\Delta a}{d}\right) \quad (13)$$

式中: a_1 为初始位置矩形光斑的边长; a_2 为移动后矩形光斑的边长; Δa 为单个像元的尺寸。将 CCD 相机前后移动 200 mm, 测得初始光斑边长为 7.44 mm, 移动后光斑边长为 7.38 mm, 所选 CCD 像元尺寸为 4.54 μm , 计算得到发散角为 $0.017^\circ \pm 0.000\ 023^\circ$ 。

3) 辐照度测试

振镜进行蛇形扫描时, 扫描完成一幅图的时间约为 0.07 s, 远小于太阳辐射计的热电平衡时间, 因此振镜扫描光源可用于辐射计的照度测试。

振镜扫描光源的辐照度和稳定性指标采用太阳辐照度绝对辐射计(SIAR-5a)检测。SIAR-5a 通过外场定标, 溯源至世界辐射基准(WRR)^[20], 与 SIAR-2c^[21] 的相对偏差小于 0.1%, 如图 18 所示。

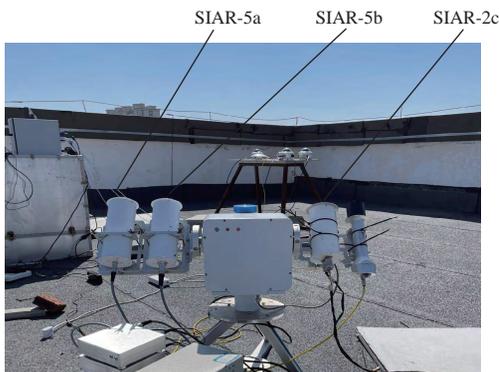


图 18 外场比对定标装置

Fig. 18 Field comparison for calibration device

将振镜扫描光源入射到太阳辐射计中, 太阳辐射计测得照度值如表 2 所示。

表2 太阳辐射计照度测试数据

Table 2 Test data of solar radiometer illuminance

次数	照度/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
1	1 431.19
2	1 430.57
3	1 430.77
4	1 430.71
5	1 431.23
6	1 431.12
7	1 431.26
8	1 430.55
9	1 431.10
10	1 431.09
平均值	1 430.96
标准差	0.28
相对标准差	0.000 19

可见测量结果具有良好的重复性且接近一个太阳常数, 进一步验证了通过振镜扫描获取的面光源可用于照度测试。由于真空共光路 Y 字型比对系统的转角误差小于 0.01° , 根据真空窗口尺寸可计算出两次测量时入瞳位置重叠面积占比为 99.861%, $\pm 1\%$ 的均匀性将引入 0.000 14% 不确定度。因此基于激光扫描振镜得到稳定性优于 0.02%、空间均匀性优于 $\pm 1\%$ 的辐照度定标光源, 可实现 0.03% 的照度定标需求。但本文中光源为单色激光, 为实现太阳辐射计由外场定标至实验室定标的转变, 仍需进行不同谱段下的照度测试, 并基于太阳光谱辐射分布设计多光谱定标拟合校正算法。

3 结论

本文根据实验室难以获取高均匀、高稳定的面光源的问题, 提出了 1 种基于振镜扫描下的辐照度定标光源。通过对初始参数设计、优化, 建立了整体光学系统, 令 1 束稳定的激光光源通过振镜扫描系统。通过对比 3 种不同扫描方式, 最终选用蛇形扫描方式获取面光源, 并通过 CCD 相机评估了输出面光源的均匀性、发散角, 验证发现输出光斑的均匀性在 $\Phi 10\ \text{mm}$ 范围内优于 $\pm 1\%$, 发散角小于 $\pm 0.26^\circ$ 。最后通过太阳辐射计测试振镜系统输出的面光源照度值, 测量结果达到一个太阳常数, 稳定性优于 0.02%。基于激光振镜的高稳定辐照

度定标光源的建立,满足低温辐射计定标光源的参数需求,为我国实现高精度 TSI 测量奠定关键技术基础。

参考文献:

- [1] SOLANKI S K, KRIVOVA N A, HAIGH J D. Solar irradiance variability and climate[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2013, 51: 311-351.
- [2] STEPHENS G L, LI J, WILD M, et al. An update on earth's energy balance in light of the latest global observations[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(10): 691-696.
- [3] FOX N, GREEN P. Traceable radiometry underpinning terrestrial-and helio-studies (truths): an element of a space-based climate and calibration observatory[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(15): 2400.
- [4] 卢乃锰, 丁雷, 郑小兵, 等. 中国空间辐射测量基准技术[J]. *遥感学报*, 2020, 24(6): 672-680.
LU Naimeng, DING Lei, ZHENG Xiaobing, et al. Introduction of the radiometric benchmark satellite being developed in China for remote sensing[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2020, 24(6): 672-680.
- [5] 衣小龙, 方伟, 李叶飞, 等. 太阳辐照度绝对辐射计的定标新方法[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(9): 156-162.
YI Xiaolong, FANG Wei, LI Yefei, et al. New calibration method of solar irradiance absolute radiometer[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9): 156-162.
- [6] 吴铎, 王凯, 叶新, 等. 空间低温绝对辐射计研究[J]. *发光学报*, 2019, 40(8): 1015-1021.
WU Duo, WANG Kai, YE Xin, et al. Space cryogenic absolute radiometer[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(8): 1015-1021.
- [7] 庞伟伟, 郑小兵, 李健军, 等. 低温绝对辐射计不同定标光路的比对实验[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(3): 250-255.
PANG Weiwei, ZHENG Xiaobing, LI Jianjun, et al. Comparison experiment of cryogenic radiometer of different calibration optical path[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 250-255.
- [8] THUILLIER G, ZHU P, SNOW M, et al. Characteristics of solar-irradiance spectra from measurements, modeling, and theoretical approach[J]. *Light:Science & Applications*, 2022, 11: 79.
- [9] 张俊超, 徐楠, 许宁, 等. 绝对辐射计溯源至低温辐射计实验测试[J]. *光学学报*, 2022, 42(5): 105-110.
ZHANG Junchao, XU Nan, XU Ning, et al. Experimental study on traceability of absolute radiometer to cryogenic radiometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(5): 105-110.
- [10] 肖岚, 袁银麟, 翁建文, 等. 基于振镜的准直光源功率稳定控制器[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(24): 3189-3197.
XIAO Lan, YUAN Yinlin, WENG Jianwen, et al. Power stability controller for collimating-light source based on scanlab[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(24): 3189-3197.
- [11] YE X, YI X L, LIN C, et al. Instrument development: Chinese radiometric benchmark of reflected solar band based on space cryogenic absolute radiometer[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2856.
- [12] SONG B Q, YE X, FINSTERLE W, et al. The Fengyun-3E/joint total solar irradiance absolute radiometer: instrument design, characterization, and calibration[J]. *Solar Physics*, 2021, 296(3): 1-18.
- [13] LI X, LIU B, MEI X S, et al. Development of an in-situ laser machining system using a three-dimensional galvanometer scanner[J]. *Engineering*, 2020, 6(1): 68-76.
- [14] ASADA N, MATSUKI H, MINAMI K, et al. Silicon micro-machined two-dimensional galvano optical scanner[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1994, 30(6): 4647-4649.
- [15] 徐亮亮. 二维激光振镜扫描控制系统设计[D]. 长春: 长春理工大学, 2013.
XU Liangliang. Design of scanning control system for two-dimensional laser galvanometer[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2013.
- [16] 何坚, 郭泽龙, 罗松保, 等. 基于PMAC时基控制的离轴抛物面超精密加工技术[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(8): 1891-1898.
HE Jian, GUO Zelong, LUO Songbao, et al. Ultra-precision machining technology of off-axis paraboloid surface based on PMAC time-based control[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(8): 1891-1898.
- [17] 刘作业, 李露, 胡碧涛. 离轴抛物面镜对超短激光脉冲聚焦特性的研究[J]. *激光技术*, 2012, 36(5): 657-661.
LIU Zuoye, LI Lu, HU Bitao. Focusing property for ultra-short pulse laser reflected by off-axis parabolic mirrors[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(5): 657-661.
- [18] KOPP G, HEUERMAN K, HARBER D, et al. The TSI radiometer facility: absolute calibrations for total solar irradiance instruments[C]//*Proceedings of Optical Engineering+Applications*. San Diego: SPIE, 2007, 6677: 94-

- 105.
- [19] 张国玉, 吕文华, 贺晓雷, 等. 太阳模拟器辐照均匀性分析[J]. 中国光学与应用光学, 2009, 2(1): 41-45.
ZHANG Guoyu, LYU Wenhua, HE Xiaolei, et al. Analysis on irradiation uniformity of sun simulator[J]. Chinese Journal of Optics and Applied Optics, 2009, 2(1): 41-45.
- [20] SONG B Q, FINSTERLE W, YE X, et al. Calibration and parameter corrections for the new generation of the TSI monitor on the FY-3E satellite[J]. Astrophysics and Space Science, 2021, 366(3): 1-8.
- [21] 禹秉熙, 姚海顺, 方伟. 绝对辐射计预测辐射电补偿的快速测量方法[J]. 光学学报, 2005, 25(6): 786-790.
YU Bingxi, YAO Haishun, FANG Wei. Rapid measurement method of absolute radiometer by using forecast radiation in electrically heating compensation[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(6): 786-790.