

文章编号 1004-924X(2012)11-2338-07

## 多角度偏振辐射计星上积分球结构设计及检测

宋茂新\*, 杨本永, 袁银麟, 洪 津

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所 光学遥感中心, 安徽 合肥 230031)

**摘要:**为满足星载多角度偏振辐射计六孔径同时定标及全光路定标的要求,根据多角度偏振辐射计的光路特点和结构约束设计了六出孔椭球形积分球定标源,并对积分球辐射输出的一致性、均匀性及偏振特性进行了检测。其中,一致性的检测采用定标后的光谱辐射计直接测量;均匀性的检测考虑积分球出口小,采用了透镜加光阑扫描的方法;偏振度的检测使用了根据马吕斯消光定律设计的线偏振检测仪。实验和检测结果表明,采用的检测和数据处理方法提高了系统的信噪比和测量的准确性。积分球成对开孔输出一致性优于 99.5%,面均匀性优于 99%,偏振度低于 1%,这些结果满足多角度偏振辐射计的辐射定标需求。

**关键词:**多角度偏振辐射计;积分球;偏振度;定标

**中图分类号:**P111.4;TP73 **文献标识码:**B **doi:**10.3788/OPE.20122011.2338

## Structure design and test of onboard calibration integrating sphere of multi-angle polarimetric radiometer

SONG Mao-xin\*, YANG Ben-yong, YUAN Yin-lin, HONG Jin

(Center for Remote Sensing, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

\* Corresponding author, E-mail: smx0369@aiofm.ac.cn

**Abstract:** In order to calibrate the six apertures of a multi-angle polarizing radiometer synchronously and to meet the need of full beam path calibration, a six-hole ellipsoid integrating sphere calibration source was designed according to the optical characteristics and structural constraint of the polarizing radiometer. Then the consistency, uniformity and polarization of the integrating sphere output were tested. In the test, the consistency was directly measured by using the scaled spectral radiometer, while the uniformity was detected by using the scanning method combined a lens and apertures in consideration of the small outlet of the integrating sphere. Furthermore, the degree of polarization was detected by a linear polarization detector designed based on the Marius extinction law. Experiments demonstrate that the detection methods and data processing have enhanced the signal-to-noise ratio as well as the accuracy of the system. It is shown that the brightness consistency of paired openings for the integrating sphere is better than 99.5%, the surface uniformity is better than 99%, and the degree of polarization is below 1%, which satisfies the needs of radiometric calibration of the multi-angle polarizing radiometer.

**Key words:** multi-angle polarimetric radiometer; integrating sphere; degree of polarization; calibration

收稿日期:2012-05-02;修订日期:2012-06-13.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 40971196)

## 1 引言

航天多角度偏振辐射计的主要任务是获得大气气溶胶及云的多角度多光谱偏振信息,同时提供目标的辐射强度信息。其探测方法主要参考了美国偏振仪器 EOSP(Earth Observing Scanning Polarimeter)<sup>[1-2]</sup>,通过分口径的方法同时测量目标的 0, 90, 45 和 135° 线偏振分量,进而求解 Stokes 矢量获得目标的偏振信息。由于使用了两路光学系统和 4 个探测器来获取同一目标的 Stokes 矢量,其定标探测器必须能够很好地响应并监测系统的性能变化,才能保证仪器的数据质量。因此星上定标系统是该仪器的重要组成部分。

根据引入光源方式,星上定标主要有漫射板法,积分球法及直接观测法(恒星法)。漫射板法一般引入太阳辐射作为定标源<sup>[4,7]</sup>,其优点是功耗低,光谱分布理想;但是漫射板性能容易衰退,增加折叠或遮挡机构不但不能有效防止漫射板的性能衰退还会引入不可靠因素,此外入射角度以及季节变化引起的辐射变化也对标定结果有影响。安徽光学精密机械研究所正在研究的基于比辐射计的定标方法,将漫射板光和太阳光在短时间内分别引入小积分球,并通过辐射计测量,根据辐射计比值监测漫射板的性能衰变,以尽可能消除漫射板性能衰变引入的不良影响,但该方法存在结构复杂的缺点。积分球法具有稳定性好<sup>[7,9]</sup>,光路切入灵活,结构紧凑无动件的优点,其缺点在于功耗大,精度与光谱分布不够理想。直接观测法虽无附加机构,但对卫星平台、仪器视场以及目标源都有较高的要求。

目前,星上定标器基本都针对于非偏振探测仪器,对定标源的偏振特性无严格要求。而由于偏振敏感性,定标源的偏振特性直接影响偏振仪器的定标精度。积分球自身具有消偏特性,输出辐亮度具有优良的均匀性和稳定性,因此积分球法是满足偏振特性要求的简易定标方法。本文对用于多角度偏振辐射计星上定标积分球进行了设计与检测。

## 2 仪器原理及定标需求

多角度偏振辐射计的光学原理如图 1 所示,

为表达清楚,图中省略了 4 路系统的分色片和聚焦透镜等。目标信号或定标信号被旋转正交反射镜组引入 6 路主光学系统,经前置望远系统后被渥拉斯顿棱镜分为振动方向互相垂直的两束线偏振光,图中只示意了一束,分色片分束后经聚焦透镜和滤光片被二元探测器接收。相邻主光路中的渥拉斯顿棱镜方位互成 45°,以实现 0, 90, 45, 135° 4 个振动方向上线偏振分量的同时探测。

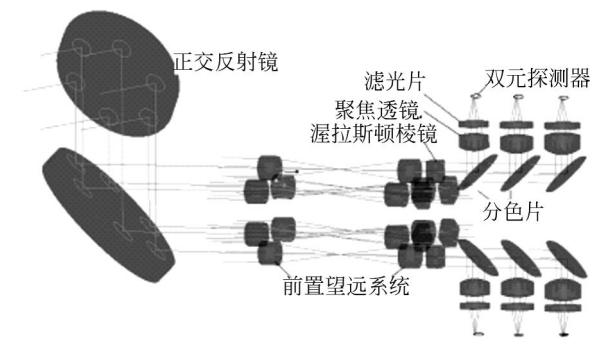


图 1 多角度偏振辐射计的光路原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical path of multi-angle polarimetric radiometer

多角度偏振辐射计将被测信号分解为 4 个偏振分量同时探测,为将 4 个偏振分量对应的系统增益建立统一关系<sup>[3]</sup>,需要对 6 路光学系统实现全光路同时定标,即保证定标信号同时充满各路系统的视场和孔径并通过所有光学器件。这样一方面需要定标信号为非偏振光或圆偏振光,以保证同一通道在两个振动方向的辐射量相等;另一方面还需要保证成对通道定标信号的辐射量及偏振态相同。理论上已知偏振角的线偏振光也可满足定标要求,但由于控制困难,在此不做讨论。定标积分球的性能要求如表 1 所示。

表 1 积分球性能要求

Tab. 1 Performance requirements of integrating sphere

辐亮度(555 nm 处)	20~30 $\mu\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm}^{-1})$
一致性	$\geq 99.5\%$
均匀性	$\geq 99\%$
偏振度	$\leq 1\%$

## 3 积分球结构设计<sup>[7,9]</sup>

根据全光路定标要求,利用正交镜组的扫描,确定在正交反射镜组前切入积分球光路。

### 3.1 积分球开口及灯的位置

根据仪器结构参数和瞬时视场,积分球在 6 路光路的对应视场位置开孔,即采用开 6 个小口的方案,该方案不但使积分球一定体积下开口比最小,还可将灯放置在 6 开口中间,提高开口的均匀性和一致性,并使灯处于仪器内部形成防护。开口大小根据全光路的定标需求,其影响因素包括仪器的瞬时视场、曝光时间内扫描角度的变化和光路视场位置的变化、电机定位误差及加工装配误差等。最终积分球开口面积与总面积之比,

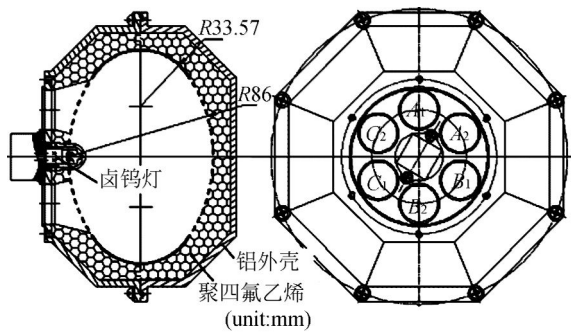


图 2 积分球结构图

Fig. 2 Diagram of integrating sphere structure

即开口比约为 0.17。光源采用了输出稳定的卤钨灯,且灯丝与球内壁曲线相切,以减弱出射光的非均匀性,如图 2 所示。

### 3.2 内壁曲线及材料

受体积重量约束并兼顾均匀性指标,积分球内壁未采用传统的正球结构,而采用了类椭球,即在平行出射光方向的截面曲线为光滑相切的四段圆弧,垂直光轴截面为圆,如图 2 所示。曲线曲率与灯的位置保证积分球出口无一次反射光成分。积分球内壁材料采用模压成型的聚四氟乙烯材料,它具有反射率高,朗伯性与稳定性均良好的优点。

## 4 积分球性能指标的检测

### 4.1 辐亮度一致性检测

为获得积分球的谱亮度<sup>[7-8]</sup>,采用实验室光谱辐射计进行测量,首先对光谱辐射计进行了检测和定标,包括波长准确度,光谱辐亮度响应度,非线性以及稳定性的检测,其光谱辐亮度响应度的定标使用的是标准灯-漫反射板方法,其不确定度如表 2 所示。

表 2 光谱辐射计不确定度

Tab. 2 Uncertainty of spectral radiometer

	波长/nm									
	400~800			800~2 000				2 100~2 500		
标准灯-参考板系统不确定度	2.37~1.79			1.84~3.52				3.59		
波长偏差	0.78	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03	0.14	0.32	0.4	0.59
非线性	0.01	0.01	0.05	0.04	0.04	0.12	0.15	2.84	2.52	0.18
非稳定性	0.2	0.11	0.09	0.2	0.34	0.13	0.91	0.15	0.1	0.19
合成不确定度	2.38	2.37	1.79	1.80	1.89	1.85	3.64	4.53	4.39	3.60

使积分球卤钨灯工作在额定条件,在实验室条件下分别测量 3 对开口的光谱辐亮度,成对开孔辐亮度的非一致性按照公式(1)计算并表示。

$$\left| \frac{L_{x_1}(\lambda) - L_{x_2}(\lambda)}{L_{x_2}(\lambda)} \right| \times 100\%, \quad (1)$$

其中:  $L_{x_1}(\lambda)$  表示开口  $x_1$  在波长  $\lambda$  下的辐亮度,下标  $x_1, x_2$  表示成对开孔的编号,结果如图 3 所示。

根据表 2,由于标准传递及光谱辐射计自身的不确定度,使曲线两端的数据质量较差,非一致性呈上升趋势。而理论上只要卤钨灯光源的光谱确定,光谱上的非一致性差异应该很小,所以可以判

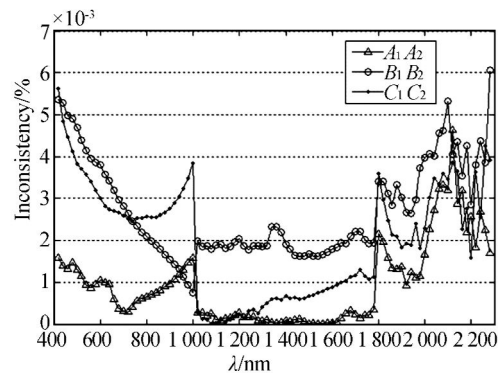


图 3 成对开孔亮度非一致性

Fig. 3 Brightness inconsistency of paired openings

断 3 对开口的辐亮度非一致性小于 0.5%。由于光谱辐射计的探测器在 1 000 和 1 800 nm 处有拼接,非一致性出现明显突变,进一步说明非一致性主要来自光谱辐射计自身,该结论需利用标准探测器加滤光片的方法进一步确认。为验证测试数据,在短波波段定标时避免使用 B、C 通道,由于非一致性高于 0.5% 的长波波段远离我们的定标波段,可以忽略。此外,555 nm 的辐亮度为 30.539 6 μW/(cm<sup>2</sup> · sr · nm<sup>-1</sup>),略大于指标要求,需降额使用。

4.2 照度均匀性的检测

积分球的均匀性一般指开口出射照度的均匀性,由于被测积分球的开口小,普通的直接探测器法无法采集到足够的有效点,所以使用了透镜+光阑+探测器的检测系统<sup>[6]</sup>,该系统的视场为 4°,杂散光水平低于 0.1%,探测器精度优于 0.03%。检测原理如图 4 所示,积分球出口处一定面积和孔径角的光经透镜成像在探测器前的视场光阑处,最终被陷阱探测器接收。检测系统固定在二维平移台上,扫描间隔为 0.5 mm,截取出口处 20 cm × 20 cm 的正方形面积的数据,按照公式(2)进行归一化,用以表示出口照度的均匀性。

$$\frac{DN(i, j)}{DN_{\max}} \times 100\%, \quad (2)$$

其中:DN(i, j)表示纵横坐标分别为 i, j 下的 DN 值, DN<sub>max</sub>表示扫描范围内最大 DN 值,利用 MATLAB 语言编程,进行数据插值处理得 A<sub>1</sub> 孔的曲线如图 5 所示,其余孔的非均匀性见表 3。

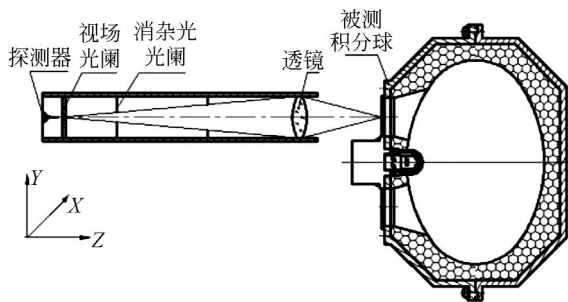


图 4 均匀性检测原理图

Fig. 4 Schematic diagram of uniformity test

由于测试系统在开口边缘有遮挡以及软件插值的原因,开口边缘的均匀性下降并出现数值 1.1,所以可以认为 A<sub>1</sub> 开口的面均匀性优于 99%,其他开口的曲线类似,将 6 个开口边缘的归一化数据剔除后得到最小归一化值见表 3。可以推断,由于结构的对称性,较小的开口以及内壁材料的高反射率是良好均匀性的主要原因。

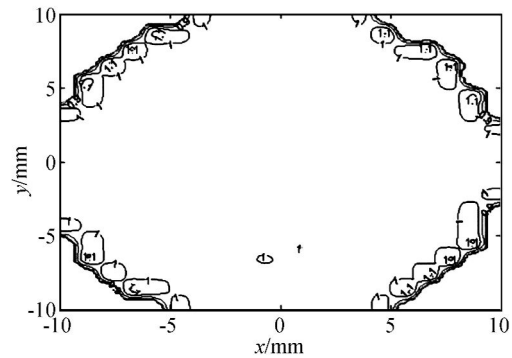


图 5 A<sub>1</sub> 孔的均匀性等值线图

Fig. 5 Contour map of A<sub>1</sub> opening uniform

表 3 各开口最小归一化值

Tab. 3 Smallest normalized values of openings

开口编号	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
最小归一化值	0.9950	0.9956	0.9951	0.9957	0.9956	0.9954

4.3 偏振度检测

4.3.1 偏振度检测原理

根据偏振度的定义,对于线偏振占主要成分的部分偏振光,可采用在探测器前加旋转偏振片的简便方法来探测信号的偏振特性,即利用线偏振光经偏振片后的出射光强遵守马吕斯消光定律进行偏振度检测<sup>[10]</sup>。利用 Stokes 矢量和 Mueller 矩阵对其进行分析,设待测光束的 Stokes 矢量 S<sub>0</sub> = [I<sub>0</sub>, Q<sub>0</sub>, U<sub>0</sub>, V<sub>0</sub>]<sup>T</sup>,系统的探测矩阵 M(θ)等于方位角变化的线偏振片的 Mueller 矩阵,经系统后的 Stokes 矢量 S<sub>d</sub> 为:

$$S_d = \begin{bmatrix} I_\theta \\ Q_\theta \\ U_\theta \\ V_\theta \end{bmatrix} = M(\theta) \cdot S_0 = \frac{1}{2} \tau \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ \cos 2\theta & \cos^2 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & 0 \\ \sin 2\theta & \sin 2\theta \cos 2\theta & \sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ Q_0 \\ U_0 \\ V_0 \end{bmatrix} =$$

$$\frac{1}{2} \tau \begin{bmatrix} I_0 + Q_0 \cos 2\theta + U_0 \sin 2\theta \\ I_0 \cos 2\theta + Q_0 \cos^2 2\theta + U_0 \sin 2\theta \cos 2\theta \\ I_0 \sin 2\theta + Q_0 \sin 2\theta \cos 2\theta + U_0 \sin^2 2\theta \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \tau \begin{bmatrix} I_\theta \\ I_\theta \cos 2\theta \\ I_\theta \sin 2\theta \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中： $\tau$ 为系统透过率， $\theta$ 为偏振片透过轴相对仪器坐标系的方位夹角，由于探测器只能响应  $I_\theta$  分量，所以探测器探测分量的表达式为：

$$I_\theta = \frac{1}{2} \tau (I_0 + Q_0 \cos 2\theta + U_0 \sin 2\theta). \quad (4)$$

假设偏振片在  $180^\circ$  的旋转角度内均匀测量 180 次，对所有测量结果求和得：

$$\sum_{j=1}^{180} I_{\theta_j} = \sum_{j=1}^{180} \left[ \frac{1}{2} \tau (I_0 + Q_0 \cos 2\theta_j + U_0 \sin 2\theta_j) \right]. \quad (5)$$

式(5)直接求和得：

$$\sum_{j=1}^{180} I_{\theta_j} = \frac{1}{2} \tau \cdot 180 \cdot I_0. \quad (6)$$

式(5)两侧同时乘以  $\cos 2\theta_j, \sin 2\theta_j$ ，并求和得：

$$\sum_{j=1}^{180} I_{\theta_j} \cos 2\theta_j = \frac{1}{2} \tau \cdot 90 \cdot Q_0, \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^{180} I_{\theta_j} \sin 2\theta_j = \frac{1}{2} \tau \cdot 90 \cdot U_0. \quad (8)$$

根据 Stokes 矢量定义的线偏振度得：

$$P = \frac{\sqrt{Q_0^2 + U_0^2}}{I_0} = 2 \cdot \frac{\sqrt{\left( \sum_{j=1}^{180} I_{\theta_j} \cos 2\theta_j \right)^2 + \left( \sum_{j=1}^{180} I_{\theta_j} \sin 2\theta_j \right)^2}}{\sum_{j=1}^{180} I_{\theta_j}}. \quad (9)$$

根据上式，使用 180 次测值甚至更多求取待测光的偏振度，可消除偏振度定义中测最大最小值带

来的不确定性和误差，提高系统信噪比和测值的准确性。

#### 4.3.2 偏振度检测结果

根据上述原理，偏振度检测使用了安徽光学精密机械研究所的专利仪器——光谱偏振分析仪，该仪器的偏振测量不确定度约为 0.1%，视场为  $\pm 1^\circ$ 。检测原理图如 6 所示，最终测量结果如表 4 所示。

由表 4 可以看出，各开口的偏振度均值小于 0.54%，但不同波段的偏振度指标没有明显的规律，除短波 443 nm, 490 nm 和长波 2 250 nm 的偏振度较大，其余波段的偏振度均低于 0.5%。考虑到仪器自身具有 0.1% 的不确定性，可以认为积分球的偏振度指标满足仪器的定标要求。此外，为提高定标精度，需要进一步降低积分球出射光的偏振度。根据消偏机理，可以研究积分球内壁材料的反射特性，开口比以及内壁曲线等因素对出射光偏振度的影响。在积分球开口处增加扰偏器是进一步降低偏振度的有效措施，但是具体效果需要进一步研究。

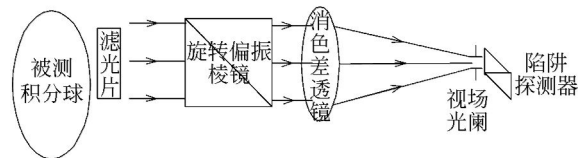


图 6 偏振测量原理图

Fig. 6 Schematic of polarization measurement

表 4 偏振测量结果

Tab. 4 Results of polarization measurement

通道	$\lambda/\text{nm}$								均值
	443	490	555	665	865	960	1640	2250	
A <sub>1</sub>	0.004 2	0.006 9	0.004 3	0.002 9	0.003 2	0.002 3	0.002 8	0.008 6	0.004 4
A <sub>2</sub>	0.008 4	0.005 0	0.004 4	0.001 9	0.004 9	0.002 4	0.001 5	0.006 9	0.004 4
B <sub>1</sub>	0.006 2	0.005 3	0.005 1	0.002 9	0.005 4	0.004 0	0.002 8	0.007 7	0.004 9
B <sub>2</sub>	0.008 3	0.007 0	0.004 6	0.002 7	0.003 0	0.004 2	0.002 8	0.008 6	0.005 2
C <sub>1</sub>	0.004 2	0.004 7	0.003 3	0.002 2	0.003 6	0.002 8	0.004 0	0.005 5	0.003 8
C <sub>2</sub>	0.004 2	0.004 9	0.005 4	0.003 2	0.006 6	0.002 4	0.002 3	0.012 9	0.005 3
均值	0.005 9	0.005 6	0.004 5	0.002 6	0.004 5	0.003 0	0.002 7	0.008 4	—

## 5 结 论

本文设计了多角度偏振辐射计的六开口椭球型定标积分球,由于其内壁的曲线结构较好避免了一次光的出射,并且其对称性的设计方案,较低的

开口比,以及内壁材料的优异特性,使不同开孔的亮度非一致性均低于 0.5%,各开口的亮度均匀性优于 99%,在 443~2 250 nm 内 8 个波段的偏振度平均值均低于 0.54%,满足了仪器的辐射定标需求。但对于高精度偏振探测仪器的辐射定标,还需要进一步研究降低出射光偏振度的机理和方法。

## 参考文献:

- [1] TRAVIS L D. *Earth Observing Scanning Polarimeter*. EOS Reference Handbook [M]. Washington DC: NASA, 1995: 77-129.
- [2] CAIRNS B, EDGAR E, RUSSELL, *et al.*. The research scanning polarimeter: calibration and ground-based measurements [J]. SPIE, 1999, 3754: 186-196.
- [3] Goddard Space Flight Center. Aerosol Polarimetry Sensor Calibration [R]. *Glory Project*, 2010.
- [4] 李东景,于平,齐心达. 星上定标积分球系统的设计[J]. 光电子技术, 2011, 31(1): 57-62.  
LI D J, YU P, QI X D. The design of spaceborne calibration integrating sphere system [J]. *Optoelectronic Technology*, 2011, 31(1): 57-62. (in Chinese)
- [5] 王淑荣,邢进,李福田. 利用积分球光源定标空间紫外遥感光谱辐射计[J]. 光学精密工程, 2006, 14(2): 185-190.  
WANG SH R, XING J, LI F T. Spectral radiance responsivity calibration of ultraviolet remote sensing spectroradiometer in space using integrating sphere [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 185-190. (in Chinese)
- [6] 徐晓峰,王冀,张黎明,等. 航天积分球面均匀性检测 [J]. 量子电子学报, 2005, 22(5): 817-820.  
XU X F, WANG J, ZHANG L M, *et al.*. Study on uniformity measurements of space integrating sphere [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2005, 22(5): 817-820. (in Chinese)
- [7] 杨本永,张黎明,陈洪耀. 可见-短波红外高光谱星上定标用积分球系统的设计[J]. 光学学报, 2009, 29(12): 3545-3550.  
YANG B Y, ZHANG L M, CHEN H Y. System design of the integrating sphere used for on-board calibration of visible-SWIR hyperspectral remote sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(12): 3545-3550. (in Chinese)
- [8] 章骏平,吴浩宇,周威. 大孔径积分球辐射源光谱辐射特性测试方法研究[J]. 量子电子学报, 2001, 18(5): 424-428.  
ZHANG J P, WU H Y, ZHOU W. Experimental study of spectral radiance characteristics of large aperture integrating sphere [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2001, 18(5): 424-428. (in Chinese)
- [9] 邢进,李福田,顾行发. 星载紫外遥感辐射计积分球定标新方法的研究[J]. 遥感学报, 2006, 10(5): 644-650.  
XING J, LI F T, GU X F. Research on the new technology of calibrations of spectroradiometer for ultraviolet space borne remote sensing based on integrating sphere [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, 10(5): 644-650. (in Chinese)
- [10] 廖廷彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 231-250.  
LIAO Y B. *Polarization Optics* [M]. Beijing: Science Press, 2003: 231-250. (in Chinese)

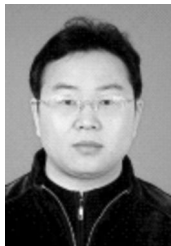
## 作者简介:



宋茂新(1983—),男,山东乳山人,博士研究生,2007年于山东大学获得学士学位,主要从事高光谱遥感方面的研究。E-mail: smx0369@aiofm. ac. cn



袁银麟(1983—),男,安徽青阳人,博士研究生,副研究员,2005年毕业于合肥工业大学,主要研究方向为先进辐射光源。E-mail: ylyuan@aiofm. ac. cn



杨本永(1976—),男,安徽萧县人,博士,副研究员,2004年,2009年于中科院安徽光学精密机械研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事光学遥感器辐射定标、在轨检测与成像光谱数据反射率反演等方面的研究。E-mail: byyang@aiofm. ac. cn



洪津(1969—),男,浙江杭州人,研究员,博士生导师,1987年于浙江大学获得学士学位,主要从事光谱遥感技术、偏振遥感技术、航空/航天遥感器工程技术的研究。E-mail: hongjin@aiofm. ac. cn

## ● 下期预告

## 数字散斑法用于铜/铝复层板拉伸变形测量

孙涛<sup>1,2</sup>, 梁晋<sup>1</sup>, 蔡勇<sup>3</sup>, 王伊卿<sup>1</sup>

1. 西安交通大学 机械工程学院, 陕西 西安 710049;
2. 四川工程职业技术学院 机电工程系, 四川 德阳 618000;
3. 西南科技大学 制造科学与工程学院 四川 绵阳 621010)

针对爆炸焊接制备的铜/铝复层材料全场应变获取难题,提出并实现了一种基于数字散斑相关法和双目立体视觉技术的全场三维变形测量方法。对该方法涉及的数字散斑相关算法、三维坐标、位移和应变计算等关键技术进行了研究。借助 VC++6.0 开发环境,研制并开发了用于铜/铝复层板全场变形测量的试验系统及其软件。为了验证本文所述测量方法的可行性,进行了精度验证实验和铜/铝复层板单向拉伸试验,并将复层板拉伸试验结果与有限元软件 Abaqus 数值模拟结果进行了对比分析。结果表明:本文方法的应变测量精度优于 0.5%,与引伸计基本相当;本文方法测得的应变极值分布与有限元模拟结果吻合很好;在板料发生颈缩前,塑性应力应变模拟曲线与试验结果很吻合,且整个变形过程中位移-载荷模拟曲线的变化趋势与试验结果一致,模拟得到的极限载荷的相对误差为 0.06%~2.25%,这说明数字散斑方法是一种精确获得复层板料全场应变的有效手段。