

文章编号 1004-924X(2010)09-1943-08

大口径积分球方向辐射特性自动测试系统

谢 萍, 吴浩宇, 郑小兵, 邹 鹏

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

摘要: 研制了一套全自动测量系统, 快速、高精度地检测了大口径积分球的方向辐射特性。该测量系统由扫描机构、陷阱探测器和总控系统组成, 总控系统控制安装有陷阱探测器的扫描机构按设定的位置进行位移, 并控制数据采集器进行数据采集, 最后完成数据显示、分析及保存。该系统面均匀性扫描范围为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$, 角度特性扫描范围为 $\pm 60^\circ$ 。利用该测量系统对自行研制的 2.5 m 直径积分球进行了测量, 实现了全自动控制, 证实了该测量系统测量速度快, 测量精度高, 得到该积分球的面均匀性为 0.19% , 在 $\pm 45^\circ$ 范围内朗伯最大偏移为 1.03% , 水平方向角度特性为 $0.010\ 3$, 垂直方向角度特性为 $0.006\ 8$ 。该系统已成功用于国内多个大口径积分球的测量, 获得了满意的测试结果。

关键词: 大口径积分球; 方向辐射特性

中图分类号: O432.2; TH703 文献标识码: A doi:10.3788/OPE.20101943.1943

Automatic directional radiometric testing system for large aperture integrating spheres

XIE Ping, WU Hao-yu, ZHENG Xiao-bing, ZOU Peng

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

Abstract: An automatic testing system is developed to test directional radiometric characteristics of large aperture integrating spheres quickly and precisely. The testing system is made up of a scan unit, a trap detector and a control unit. The control unit controls the scan unit fixed with the trap detector to displace according to the set position, then controls the data collector to collect, display and save the data. The system shows its scan ranges of plan uniformity and the directional characteristic are $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ and $\pm 60^\circ$, respectively. The system is used to test a large aperture integrating sphere with a diameter of 2.5 m , which is automatic and characterized by high precision and efficiency. Obtained results indicate that the plan uniformity is 0.19% , and the maximum offset of Lambert characteristic is 1.03% at $\pm 45^\circ$. Currently, the system has been successfully applied to the test of large aperture integrating spheres for many times, and satisfied results are obtained.

Key words: large aperture integrating sphere; directional radiometric characteristic

收稿日期: 2009-11-29; 修订日期: 2009-12-29.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2007AA12Z106)

1 引言

积分球作为朗伯光源在高精度辐射定标中应用广泛^[1-2]。目前,我国遥感实验室定标的标准传递链可描述为:低温绝对辐射计—辐亮度标准探测器(基于陷阱探测器)—积分球—星载遥感器。作为传递链中的一环,积分球的测量不确定度对整个传递链不确定度具有重要影响。为实现高精度的标准传递,必须对积分球本身的方向辐射特性,即出光口的面均匀性和角度均匀性进行精密检测。

积分球方向辐射特性的测试主要有两种方法,第一种是利用科学级高分辨率 CCD 成像系统对出光口成像,对探测单元辐射输出进行分析^[3]。这种方法测量周期较短,但是受 CCD 本身特性的限制,其测量不确定度较高。第二种是用陷阱探测器在出光口进行逐点扫描,对测量值进行分析,由于低温辐射计的陷阱探测器测量精度较高,所以此方法已广泛应用于科研测试中,本文就采用了此方法。

以往这项测试都采用手动测量,即在积分球出光口选择代表性的点,手动放置探测器,测量后记录测量数据并进行数据处理^[4]。由于测量期间引入了较多人为不确定度,花费大量时间却难获得较好的精确定位和复现性,面对小孔径的积分球尚能测量,当面对大孔径的积分球时就很难获得准确数据。随着科技的发展,人们对测量精度和效率的要求越来越高,传统的测量方法已无法满足需求。因此,本文针对积分球辐射源的方向辐射特性参数,研制了一套自动测量其性能参数的测试系统。该系统由扫描机构、陷阱探测器和总控系统组成,采用高精度的陷阱探测器测量视场范围内积分球的输出光通量,全自动控制扫描整个积分球出口,并自动进行数据分析及保存。较以往的手工检测,该方法具有检测快速、定位精确、重复性高的特点,降低了测试人员的劳动强度,避免了人为因素的影响,特别适用于大口径积分球特性检测。

2 测量与评估方法

2.1 积分球面均匀性

面均匀性表征积分球出光口平面内不同位置

的辐亮度的相对偏差程度,通常以非均匀性表示,即多个测点测值之间的相对标准偏差。测量时,将陷阱探测器固定在二维平移台上,其光轴垂直于出光口面,分别沿水平方向和竖直方向平移陷阱探测器,进行网格状测量,如图 1 所示。

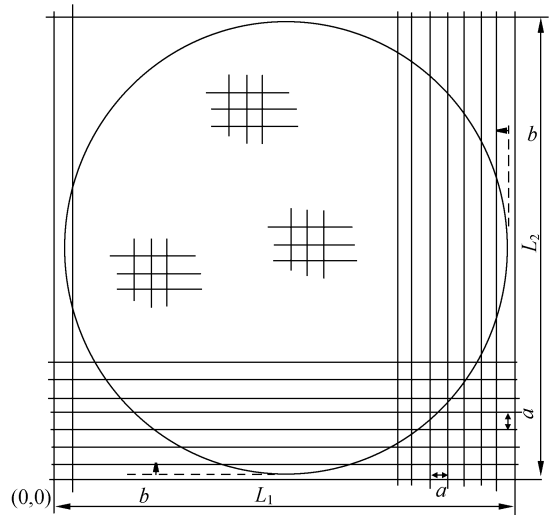


图 1 积分球面均匀性测量方法示意图

Fig. 1 Sketch of plan uniformity test

各测点采样 n 次取均值,非均匀性计算公式如下:

$$u = \text{Std}(V_i) / \bar{V} \times 100\% \quad (1)$$

式中: u 为非均匀性; V_i 为各有效点测量电压值(有效点指在出光口内且剔除接近边缘测值明显变化的测点); \bar{V} 为各有效点测量电压值的均值; $\text{Std}(V_i)$ 为各有效点测量电压值的标准偏差。

2.2 角度特性测量

角度特性表征相对于积分球出光面法线一定角度范围内的朗伯偏移量,通常以多个角度测量的测值相对于法线测值的相对偏差来表述。将陷阱探测器固定在积分球几何特性测试系统角度特性测量台上,在垂直、水平方向以 β° 间隔旋转探测器进行测量,测量角度为 $\pm\alpha^\circ$ (角度的正负规定如图 2、图 3 所示)。设探测器测光轴垂直积分球出光口法线时为 0° 位置,各角度点采样 n 次取均值,以各角度测值相对于 0° 位置测值的偏离表征其角度特性,如公式 2 所示。

$$d = \max(|1 - V_{\theta_i} / V_0|), \quad (2)$$

式中: d 为角度特性; V_{θ_i} 为个测量点电压均值; V_0 为零度位置的测量电压均值。

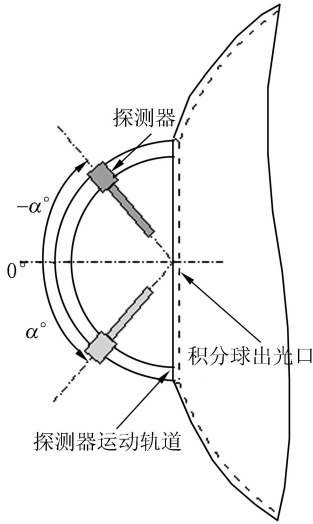


图 2 垂直方向角度特性测量示意图

Fig. 2 Sketch of vertical directional characteristic test

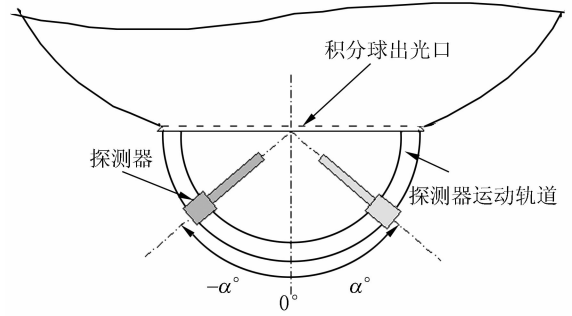


图 3 水平方向角度特性测量示意图

Fig. 3 Sketch of horizontal directional characteristic test

3 测量系统的研制

为实现对自行研制的出口直径为 1 m 的积分球的测试,研制了方向辐射特性测量装置。系统由扫描机构、陷阱探测器和总控系统组成,表 1 列出系统主要构成及用途。装置实物图如图 4、5 所示,各组成部分的详细设计如下。

表 1 积分球方向辐射特性测试系统主要构成

Tab. 1 Main compositions of directional radiometric testing system of integrating sphere

序号	部件名称	设备名称	用途	主要技术指标
1	扫描机构	面均匀性测量装置	二维网格状机械扫描	扫描范围:1 000 mm×1 000 mm 扫描速度:≥5 mm/s 定位精度:±1 mm 平台扭摆:≤±0.5°
		角度特性测量装置	定点变角度扫描	扫描角度:±60°; 运动速度:≥2 (°)/s 定位精度:±0.5° 平台扭摆:≤±0.5°
2	探测部件	Si-Trap 全波段辐射亮度探测器	辐射量探测	探测器非稳定性((23±5)°C): ≤±0.05%/h 探测器相对灵敏度:5×10 ⁻⁶ (最大输出信号 10 V 时) 视场全角:3° 视场光阑:Φ6 视场外杂散光影响:≤0.3%
		数据采集器	探测器输出数据采集	基本直流电压精度:0.004% 长期稳定性:0.004%/year
3	总控系统	步进电机控制器	机械扫描装置驱动	控制轴数:1~3 适用电机及驱动能力:两相步进电机(3.5A) 扫描细分:2,4,8,16,32,64,128 加减速方式:三角形或梯形方式 通讯接口:RS232 标准
		计算机+控制软件	自动扫描测量控制	执行自动扫描测量过程;LabVIEW7

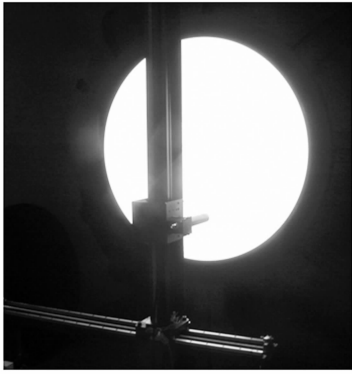


图 4 面均匀性测量装置实物

Fig. 4 Device of plan uniformity test

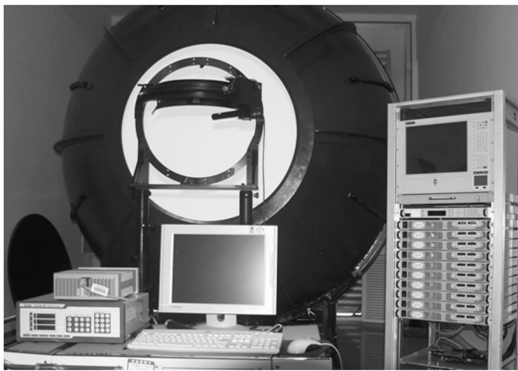


图 5 角度特性测量装置实物

Fig. 5 Device of directional characteristic test

3.1 扫描机构

3.1.1 面均匀性测量装置

面均匀性测量装置为二维组合式运动平台,由二维扫描机构、支架和底盘组成。二维扫描机构由步进电机、滚珠丝杠、线性滑轨和运动平台等组成。本测量装置主要功能是通过步进电机驱动滚珠丝杠实现探测器平台的二维运动,为此在垂直扫描方向上使用了中空的 T 型导轨,并在垂直扫描导轨正对目标方向加装一 V 字型、表面开有许多凹槽的吸光板遮挡 T 型导轨的反射以降低测试系统的表面反射。

3.1.2 角度特性测量装置

角度特性测量装置由探测器运动平台、半圆弧轨道、支架和底盘组成,探测器运动平台由步进电机驱动,通过一对蜗轮蜗杆啮合传动在半圆弧轨道上实现半圆周运动,使得探测器在运动过程中能保持光轴始终指向圆心,探测器运动轨道可

水平和竖直安装,以实现两个方向的角度特性测量。在测量时,圆形支架与积分球出光口平面应重合,以便经位置调整后探测器测量光轴在角度扫描过程中在不同角度都能始终指向球口中心。图 6 为以往手工测量的示意图,探测器的直线运动引入了距离效应误差。

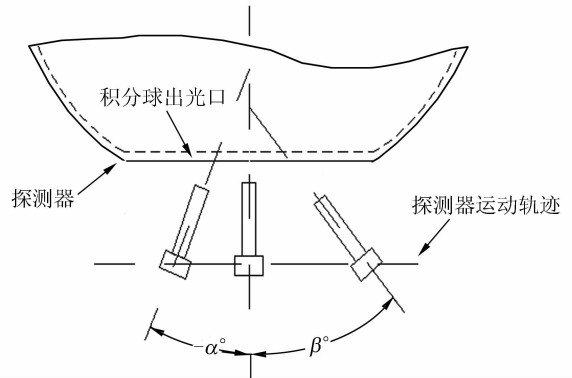


图 6 手工测量示意图

Fig. 6 Sketch of manual test

3.2 探测部分

探测部分选用了实验室研制的 Si 光电二极管陷阱标准传递探测器^[5-8],加装了孔径光阑和视场光阑,以实现积分球出光口的方向辐射特性测量,具有很好的稳定性和线性,且噪声低,适合长时间的实验需求。前端增加的孔径光阑和视场光阑可有效限制探测器的有效孔径和接收立体角,保证入射光 5 次反射过程均发生在光敏面内并使信噪比达到最大。

3.3 总控系统

3.3.1 步进电机控制器

电气控制部件选用了北京卓立汉光仪器有限公司的 SC300-B 型电移台控制箱。这是一款 1~3 轴点对点 (PTP) 位置集成系统,特别针对位移台/旋转台的控制,内置驱动性能优良的步进电机驱动器,控制功能强,在不接计算机的情况下也可操控位移台。利用其提供的 RS-232 串口和通讯协议以及 OCX 控件编程可实现全自动驱动扫描测量,其内部通过加减速方式的合理设定有效降低了平移台在测量过程中的振动。

3.3.2 控制软件

测量过程需要驱动步进电机实现二维平移台

和旋转台的行进,在到达目标位置后控制数据采集器对数据进行采集,最终实现数据处理、分析、显示及数据文件的保存。LabVIEW 是基于 G 语言的图形编程开发环境,非常适合用于数据采集及控制、数据分析和数据显示。因此整个控制是通过 LabVIEW 语言编程实现的^[9-10]。

程序主要完成以下功能:

- (1)扫描方式(步距(角),范围)设定;
- (2)扫描速度、加减速方式设定;
- (3)数据采集参数设定;
- (4)执行自动扫描测量过程;
- (5)对采集的数据进行处理、分析、显示并保存。

该控制软件进行面均匀性和角度特性检测的程序流程见图 7,8。

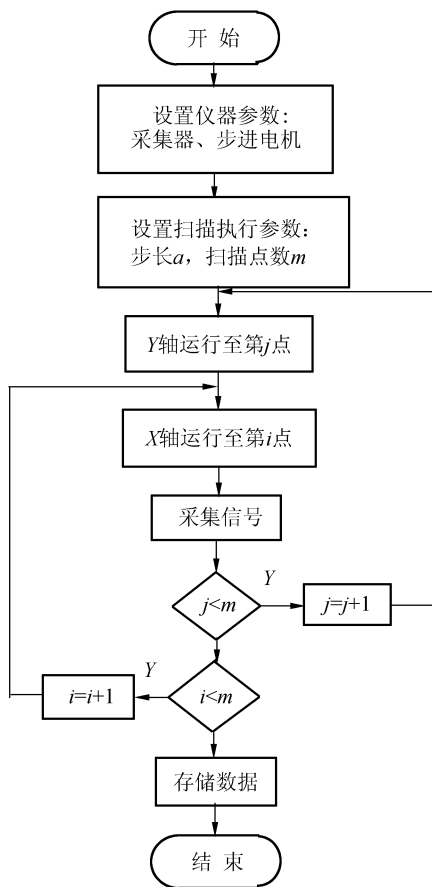


图 7 面均匀性检测程序流程

Fig. 7 Flowchart of plan uniformity test

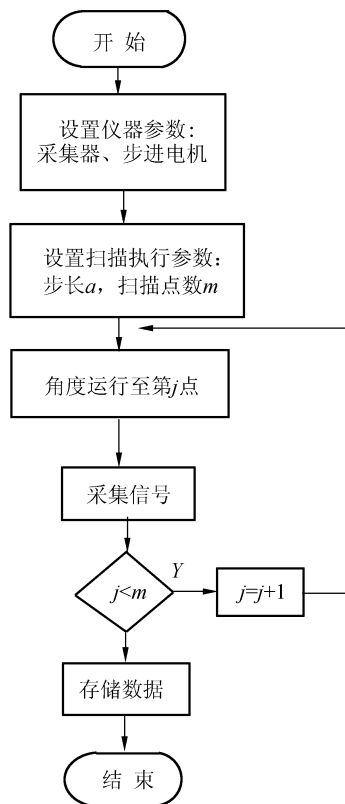


图 8 角度特性检测程序流程

Fig. 8 Flowchart of directional characteristic test

4 应用

利用所研制的积分球方向辐射特性测试系统对实验室一个内径为 2.5 m,出光口径为 1 m,内置 64 只溴钨灯的大口径积分球进行了几何特性检测。

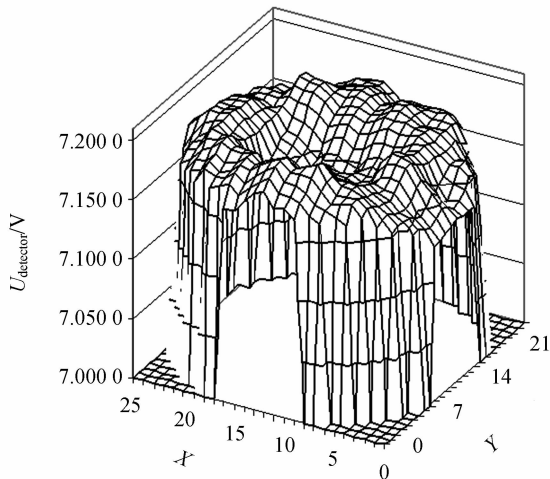


图 9 面均匀性检测探测器输出电压幅值曲面图

Fig. 9 Surface diagram of output voltage of detector in plan uniformity test

积分球 64 只溴钨灯全开,测量均匀性时,测量的是 26×26 的点阵,点间距为 37.5 mm;测量角度特性时,每 5° 测量一个点,测量了 $\pm 45^\circ$ 。测量得到的积分球面均匀性和角度特性分别如图 9~图 11 所示,测量数据分析见表 2、3。

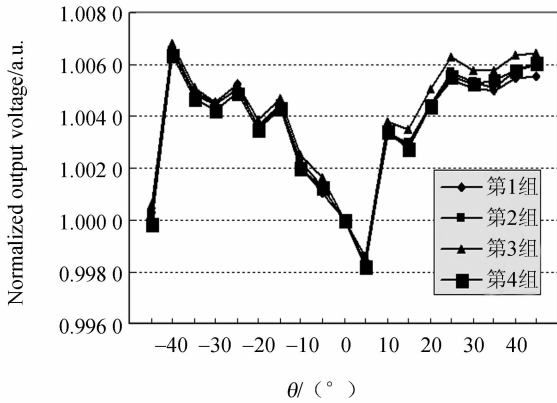


图 10 垂直角度特性测试曲线

Fig. 10 Curves of vertical directional characteristic test

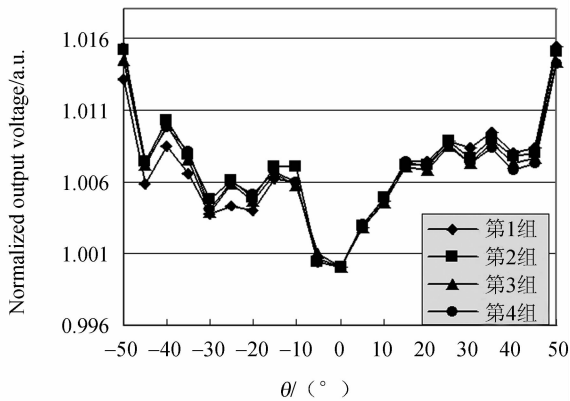


图 11 水平角度特性测试曲线

Fig. 11 Curves of horizontal directional characteristic test

表 2 面均匀性检测数据处理结果(针对中心 540 个点)

Tab. 2 Results of plan uniformity test (540 points in the center)

测点电压 均值/V	标准偏差	面均匀性	最大值 /V	最小值 /V
7.169 4	0.013 5	0.19%	7.200 3	7.129 5

表 3 角度特性检测数据处理结果

Tab. 3 Results of directional characteristic test

	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组
水平方向 $\pm 45^\circ$ 角度特性	0.009 5	0.010 3	0.010 0	0.009 7
垂直方向 $\pm 45^\circ$ 角度特性	0.006 7	0.006 5	0.006 8	0.006 4
$\pm 45^\circ$ 最大朗伯偏移	0.0103			

5 不确定度分析

积分球的面均匀性和角度特性是评价积分球的不确定度来源,由面均匀性和角度特性的测试方法和评价公式来看,就是从积分球出光口面上,按一定规律进行的抽样统计,所以二维平移台和旋转台的定位精度对于分析结果的影响可以忽略不计,主要的不确定度来源为探测器电压信号的测量。为消除随机噪声的影响,每个测值都是以多次测量的均值为测量结果。因此,该测试系统的不确定度来源主要有以下几个方面:

- * 探测器的稳定性;
- * 数据采集器的不确定度;
- * 杂散光对测量的影响。

表 4 给出了测试系统的不确定度分析表。

表 4 系统不确定度表

Tab. 4 Uncertainties of test system

不确定度来源	不确定度 ($\times 10^{-2}$)
探测器稳定性	0.006 8
数据采集器	0.004 2
杂散光的影响	0.1
合成不确定度	0.11

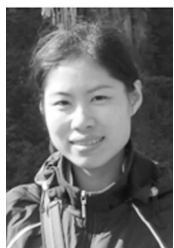
6 结 论

研制了积分球方向辐射特性测量系统,利用该系统对实验室里的一个大口径积分球进行了检测,成功地测量出积分球面均匀性和角度特性,充分表现了该系统的高精度和高效率。以往的面均匀性测量只能选择少量点进行,设计的新系统能根据被测积分球出光口径设定合适的点阵,实现几百上千个点的快速自动测量,提高了测量可靠性。角度特性测量消除了以往手动测量引起的距离效应误差和人为误差,只需几分钟就完成了以往要花几个小时完成的测量任务。目前已成功地利用该系统对多个国内大口径积分球进行了检测,并得到了满意的结果。

参考文献:

- [1] 荀毓龙, 遥感基础实验与应用[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1991: 45-60.
XUN Y L. *The Fundamental Experiment and Application on Remote Sensing* [M]. Science and Technology of China Press, 1991: 45-60. (in Chinese)
- [2] 金伟其, 胡威捷. 辐射度光度与色度及其测量[M]. 北京, 北京理工大学出版社. 2006: 163-166.
JIN W Q, HU W J. *Radiation, Luminosity, Chroma and their Measurements*[M]. Beijing, Beijing Institute of Technology Press, 2006: 163-166. (in Chinese)
- [3] LI H S, FOO S C, KENNETH E. Automated three-axis goniorelectrometer for computer graphics applications [J]. *Optical Engineering*, 2006, 45 (4): 043605-1-043605-11.
- [4] 章骏平, 吴浩宇, 周威, 等. 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. (in Chinese)
ZHANG J P, WU H Y, ZHOU W, *et al.*. Experimental study of spectral radiance characteristics of large aperture integrating sphere[J]. *Quantum Electronics*, 2001, 18(5): 424-428. (in Chinese)
- [5] 郑小兵, 吴浩宇, 章骏平, 等. 不确定度优于 0.035% 的绝对光谱响应率标准探测器[J]. 光学学报, 2001, 21(6): 749-752.
ZHENG X B, WU H Y, ZHANG J P, *et al.*. Absolute spectral responsivity standard detectors with uncertainty less than 0.035% [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, 21(6): 749-752. (in Chinese)
- [6] FOX N P. Trap detectors and their properties[J]. *Metrologia*, 1991, 28: 197-202.
- [7] 郑小兵, 吴浩宇, 章俊平, 等. 高精度光辐射定标和标准传递方法[J]. 科学通报, 2000. 45(16): 1341-1344.
ZHENG X B, WU H Y, ZHANG J P, *et al.*. High accurate radiometric calibration and standard transfer method[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(16): 1341-1344. (in Chinese)
- [8] 李照洲. 基于辐亮度标准探测器的高精度辐射定标方法与应用研究[D]. 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2005.
LI Z Z. *Studies of highly accurate radiometric calibration and application based on radiance standard detector*[D]. Graduate Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, 2005. (in Chinese)
- [9] BISHOP R H. LabVIEW7 实用教程[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
BISHOP R H. *Learning with LabVIEW7 Express*, Beijing [M]. Publishing House of Electronics Industry, 2005. (in Chinese)
- [10] 陈锡辉, 张银鸿. LabVIEW 8.20 程序设计从入门到精通[M]. 清华大学出版社, 2007.
CHEN X H, ZHANG Y H. *Program Design From Junior to Senior with LabVIEW 8.20*[M]. Tsinghua University Press, 2007. (in Chinese)

作者简介:



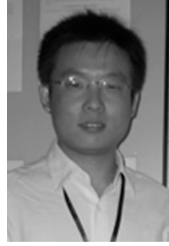
谢 萍(1979—),女,广西柳州人,助理研究员,2002年、2005年于合肥工业大学分别获得学士、硕士学位,主要从事积分球方向辐射特性及探测器特性的检测工作。E-mail: pxie@aiofm.ac.cn



吴浩宇(1963—),男,高级工程师,1985年毕业于合肥联合大学,主要从事光辐射测量的先进方法、卫星光学传感器的高精度定标和光学遥感等方面的研究。E-mail: hywu@aiofm.ac.cn



郑小兵(1969—)男,安徽合肥人,研究员,博士生导师,1990年于浙江大学获学士学位,1994年、1998年于中国科学院安徽光学精密机械研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事光辐射精密测量的先进方法,仪器、卫星光学传感器的高精度定标,光学遥感和海洋光学等方面的研究。E-mail: xbzheng@aiofm.ac.cn



邹鹏(1983—),男,内蒙古通辽人,硕士研究生,2005年于合肥工业大学获学士学位,主要从事光电探测与信号处理方面的研究。E-mail: pzou@aiofm.ac.cn

●下期预告

校正水平湍流波面的自适应光学系统带宽需求分析

刘超^{1,2},胡立发¹,穆全全^{1,2},曹召良¹,高峰³,王永伟³,宣丽¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室,吉林长春 130033;

2. 中国科学院研究生院,北京 100049;3. 空军驻长春地区军事代表室,吉林长春 130012)

在设计和搭建用于湍流校正的自适应光学系统过程中,一个要考虑的关键因素就是大气湍流波面校正所需要的系统带宽。然而对于带宽需求的问题,目前大多数文章都只是理论分析,通过实验测量的报道很少,并且通常理论的估计与实际的湍流情况相差很大。为了设计和搭建更加合理的自适应光学系统,需要对带宽需求进行精确的测量。通过对 500 m 水平距离湍流波面的大量统计,详细分析了湍流波面的时间功率谱密度,得出了所需要带宽的大小,并且首次得到了带宽需求的昼夜变化规律。实验发现,所需带宽在晚上变化缓慢,围绕 10~15 Hz 区间波动;白天变化剧烈,波动区间为 20~90 Hz。最后,通过实验确定出功率谱密度估计所需的采样总时间长度为 70 s。