

文章编号:1002-2082(2013)02-0308-05

成像法测量积分球的亮度均匀性

吕 涛^{1,2}, 张景旭¹, 付东辉¹, 陈小云¹, 刘 杰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 研究生院, 北京 100039)

摘 要:为测量某项目中经过投影物镜观察到的胶片位置处的亮度均匀性,设计采用了成像式亮度测量方法,该方法能够获得整个辐照面的相对亮度分布,较传统的采用光辐射计、光电池等采点取样测量方法便捷经济,采用成像式亮度测量方法测量得到的不均匀度为 $\pm 4.24\%$,与采用光辐射计测量得到的不均匀度 $\pm 3.92\%$ 基本一致,相对误差仅为 8.16% ,该方法可以推广应用用于太阳模拟器均匀性检测及场馆均匀照明检测等方面。

关键词:应用光学;亮度;亮度测量;均匀性

中图分类号:TN206;TH741

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201334.0203006

Luminance uniformity measurement of integrating sphere using imaging method

LÜ Tao^{1,2}, ZHANG Jing-xu¹, FU Dong-hui¹, CHEN Xiao-yun¹, LIU Jie¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130033, China;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to measure the luminance uniformity through the projection lens at the position of the film, an image luminance measurement method was used. The relative brightness distribution of the whole irradiated surface was obtained by using the image luminance measurement method which was more convenient and economical than the traditional method by using light radiometers or photocells. The non-uniformity measured by image luminance measurement method was $\pm 4.24\%$, while the non-uniformity measured by light radiometers was $\pm 3.92\%$, and the relative error was only 8.16% . This method can be applied to solar simulator uniformity measurements and venues uniform illumination detections.

Key words: applied optics; luminance; luminance measurement; uniformity

引言

光辐射计、亮度计及光电池都能够直接或间接地获得物面的辐射亮度,只是在测量过程中需要逐点测量,不仅耗时,过程复杂而且成本较高,目前基于数码相机的成像式亮度测量技术发展迅速,2000 年英国学者提出数码相机获得的照片可以用于亮度的近似测量^[1],2004 年伯克利国家实验室对高动态范围照片应用于亮度测量进行了评价^[2],2006 年以后 Helke 等人将图像式亮度测量

应用到工程实践中^[3-7],国内也有不少单位在进行这方面的研究,清华大学利用数码相机对体育馆的照明系统进行了测量,由数码照片提取的亮度估计值与实际测量的亮度值一致^[8],中国建筑科学研究院对成像式亮度测量的误差进行了分析^[9],西安电子科技大学将成像式亮度测量方法对 LED 显示屏的亮度进行了评估^[10],与传统的亮度测量方法相比,成像式亮度测量方法具有如下的优势:

收稿日期:2012-12-05; 修回日期:2012-12-25

作者简介:吕涛(1984—),男,河南济源人,博士研究生,主要从事外空间环境目标模拟光学设备和空间光学仪器的研究工作。Email:lvtao1984@gmail.com

a) 通过相机采集图像可以获得整个空间的亮度信息,获得的数据全面,避免了传统方法采样点有限导致分析结果的片面性;

b) 成像式亮度测量方法避免了测量距离不同和测量角度不同带来的测量误差;

c) 成像式亮度测量方法可以便捷地获取物空间的相对亮度分布。

某项目中需要一种能够照亮胶片的光源,要求光源在 600 nm~800 nm 有较强的辐射能量,并且要求通过投影镜头观察胶片时胶片位置处(也是积分球出光口的位置)的亮度不均匀性要优于 $\pm 5\%$,设计采用了内部涂有聚四氟乙烯涂层的积分球,由于设计指标不关注积分球出光口处的绝对亮度,而是对积分器出光口处的相对亮度分布即亮度的均匀性更关注,因此设计采用成像式亮度测量的方法对积分器出光口处的亮度均匀性进行检测。

1 测量原理

1.1 成像式亮度测量方法

成像式亮度测量方法是基于像面上所获得的照度正比于物体的亮度,且不随距离或角度的变化而变化,相机像面上的照度公式如下^[11]:

$$E = \frac{\pi \tau}{4} L \left(\frac{D}{f} \right)^2 \left(1 - \frac{f}{d} \right)^2 \quad (1)$$

式中: E 为像面照度; τ 为光学系统透过率; L 为物体的亮度; D 为相机的入瞳直径; f 为相机的焦距; d 为物距。

实际测量时, $d \gg f$,则公式(1)简化为

$$E = KL$$

式中 $K = \frac{\pi \tau}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2$ 。

显然当 D/f 不变时亦即相机的 F 数保持不变时, K 为定值,此时像面照度与物体亮度成正比关系。

成像系统焦平面的曝光量与像面照度的关系如下^[12]:

$$H = Et$$

式中: H 为像平面的曝光量; E 为像面照度; t 为曝光时间。

像面的曝光量决定着像面的明亮程度,曝光时间越长,像面越亮,本设计着重关注的是像面的均匀性指标,因此使用时只要相机不出现饱和和现

象即可。

1.2 图像灰度值与亮度的关系

文献[13]中的试验提供了图像灰度与亮度的关系图,如图1所示。

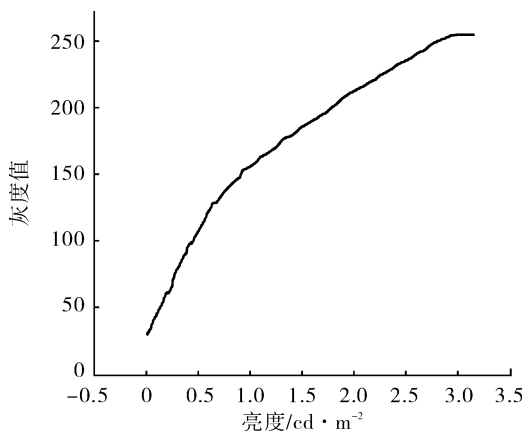


图1 图像灰度值与亮度的关系图

Fig. 1 Relationship diagram of image gray value and brightness

从图中可见,图像的灰度值与亮度并不是线性关系,但是他们仍然是一一对应的关系即有一个灰度值是唯一的亮度值,正因为这种唯一性,可以使用灰度图像来表示辐照面的亮度,若灰度图像中各个像素点的灰度值变化很小,则辐照面的亮度值也应变化越小,即辐照面越均匀。本文采用了太阳模拟器不均匀度^[14]的指标来更好地描述辐照面的均匀性,应用的辐照面亮度不均匀度计算公式如下:

$$\pm \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H_{\max} + H_{\min}} \times 100\%$$

式中: $H_{\max}$ 为灰度图像中测量区域内的最大灰度值; $H_{\min}$ 为灰度图像中测量区域内的最小灰度值。

2 被测积分球的结构

设计完成的积分球出光口直径为 $\Phi 36$ mm,积分球内部直径为 $\Phi 90$ mm,此时积分球内部反射面的面积约为出光口面积的 25 倍,积分球结构如图 2 所示。

积分球内部涂层选择不易脱离的聚四氟乙烯涂层,避免涂层粉末掉落污染胶片,同时积分球的照亮采用在 600 nm~800 nm 有较强辐射能量的卤素灯。为防止卤素灯直接照射积分球出光口,设计时将 2 支卤素灯分别放置在积分球两侧的灯室内。

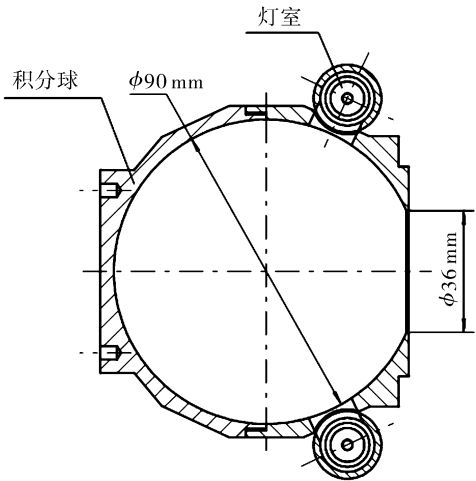


图 2 积分球的结构
Fig. 2 Structure of integrating sphere

3 均匀性测量

3.1 数码相机均匀性的标校

采用成像式亮度测量方法测量积分球出光口的均匀性,首先要对测量用的数码相机的均匀性进行标校,为此设计采用中科院长春光机所检测中心引进的 labsphere 生产的 US-120-SF 型积分球,该积分球出光口的尺寸为 $\Phi 300\text{ mm}$,出光口的不均匀性优于 $\pm 1\%$,调节积分球出光口的能量并待其输出能量稳定后用数码相机对该积分球的出光口拍照,设定相机 F 数为 8,关闭相机内置的图像增强、降噪和锐化等功能,避免图像增强处理带来测量的误差,将所获得的数字图像转成最能凸显亮度信息的灰度图像,选用的灰度图像位数为 8 位,取值范围为 $0\sim 255$,计算对应积分球出光口的灰度图像值,其最大灰度值为 227,最小灰度值为 219,因此从数码照片中得到的积分球出光口不均匀度为

$$\pm \frac{227-219}{227+219} \times 100\% = \pm 1.8\%$$

则测量用的数码相机的不均匀度为

$$\pm \sqrt{0.018^2 - 0.01^2} \times 100\% = \pm 1.5\%$$

为减小测量误差,调节积分球输出功率待其稳定后,对积分球出光口又进行了 6 次拍照测量,表 1 记录了 7 次测量的不均匀度的结果。

表 1 相机不均匀度测量结果 %

Table 1 Non-uniformity measurement results of camera						
1	2	3	4	5	6	7
± 1.50	± 1.49	± 1.50	± 1.51	± 1.51	± 1.50	± 1.50

取 7 次测量结果的平均值作为数码相机的不均匀度的标校结果即可得该测量用的数码相机的不均匀度为 $\pm 1.5\%$ 。

3.2 积分球亮度均匀性的测量

积分球的出光口本身没有“物”,因此需要在积分球出光口处放置一个“物”,本文在积分球出光口处放置了一张画有“十”字的纸,纸的厚度为 0.1 mm ,采用标校好的数码相机进行拍照,拍照前设定相机 F 数为 8 并关闭相机自带的图像增强功能,将相机调焦对准纸上的“十”字后撤去纸张按下快门直接拍照,拍照图像如图 3 所示,将该图像转为灰度图像如图 4 所示。

遍历积分球出光口的灰度图像所有像素点,其灰度最大为 237,最小为 224,因此从图像中获得的积分球出光口处的不均匀度为

$$\pm \frac{237-224}{237+224} \times 100\% = \pm 2.82\%$$

考虑相机的不均匀度,若按均方根的误差传递方式,则积分球出光口处的实际不均匀度为

$$\pm \sqrt{0.028^2 - 0.015^2} \times 100\% = \pm 2.39\%$$



图 3 积分球出光口彩色图像
Fig. 3 Color image of integrating sphere light exit port

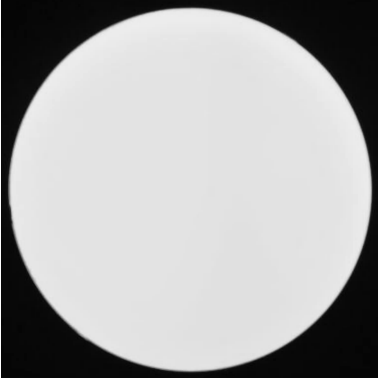


图 4 积分球出光口灰度图像
Fig. 4 Gray image of integrating sphere light exit port
对积分球出光口进行多次测量,测量结果如

表 2 所示。

表 2 积分球亮度不均匀度测量结果

Table 2 Non-uniformity measurement results of integrating sphere

integrating sphere							%
1	2	3	4	5	6	7	
2.39	2.39	2.40	2.41	2.39	2.40	2.39	

由 7 次测量的结果可以确定设计完成的积分球出光口处的亮度不均匀度为±2.39%。虽然积分球出光口自身的不均匀度达到±2.39%，但是积分球出光口处(也是胶片所在的位置)的光束经过投影物镜组后,光的均匀性分布会发生变化,因此需要测量积分球出光口经过投影物镜后的光线均匀性,该均匀性指标正是项目需要的指标。

为保证测量相机能够对准胶片,必须调节测量相机的焦距和物距,设计完成的投影物镜焦距为 28.7 mm,出射光线为平行光,因此设定相机的焦距为 28.7 mm,物距设为无穷远,F 数设为 8,当测量相机的入瞳与投影物镜的出瞳重合时,胶片上的图像充满视场(胶片前有一个 24 mm×24 mm 的方形视场光阑)。将调节好的测量相机对准胶片,然后撤去胶片直接拍照即可得到胶片所在位置处的亮度图像,该图像如图 5 所示,将其转换为灰度图像如图 6 所示。



图 5 经过投影物镜后的图像

Fig. 5 Color image through projection lens



图 6 经过投影物镜后的灰度图像

Fig. 6 Gray image through projection lens

遍历灰度图像中的所有像素点,此时最大值为 232,最小值为 212,图 7 显示的是整个像素平面内的灰度值分布。

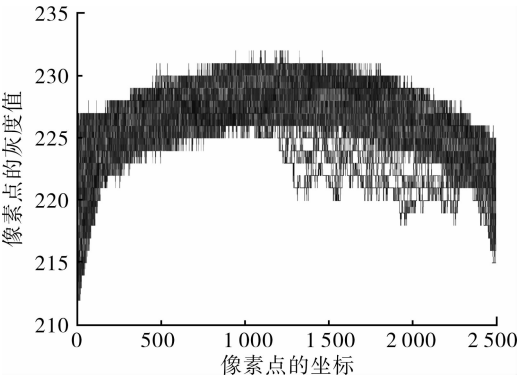


图 7 整个图像中各个像素点对应的灰度值

Fig. 7 Gray value corresponding to each pixel point in entire image

从测量结果可见,积分球出光口处经过投影物镜后的灰度均值较不经过投影物镜的灰度均值有所减小,且灰度最小值变化量比灰度最大值变化量更大,这种结果是由投影物镜的透过率及光学系统结构决定的,此处不进行深入分析。经过投影镜头后的积分球出光口处的不均匀度为

$$\pm \frac{232-212}{232+212} \times 100\% = \pm 4.5\%$$

考虑测量相机的误差,经投影镜头后积分球出光口处的不均匀度为

$$\pm \sqrt{0.045^2 - 0.015^2} \times 100\% = \pm 4.24\%$$

为减小测量误差,本文又进行了 6 次测量,7 次测量的结果如表 3 所示。

表 3 经投影物镜后不均匀度测量结果

Table 3 Non-uniformity measurement results through projection lens

projection lens							%
1	2	3	4	5	6	7	
±4.24	±4.23	±4.24	±4.25	±4.23	±4.23	±4.24	

取 7 次测量平均值作为最终的测量结果,则积分球出光口经投影物镜后的亮度不均匀度为±4.24%,达到项目技术指标要求。

4 结论

成像式亮度测量方法虽然较传统亮度测量方法精度稍差,但是它具有比传统亮度测量方法直观、便捷、经济等无法比拟的优势,亮度均匀性的测量并不要求图像上的像素点信息反应物空间对应点的绝对亮度,而更侧重于物空间各点的相对

亮度分布。本文采用成像式亮度测量方法对积分球出光口的均匀性进行了测量,测量得到的不均匀度为 $\pm 4.24\%$,而采用 Photo Research 公司生产的 PR-735 亮度计测量得到的不均匀度结果为 $\pm 3.92\%$,相对误差仅为 8.16% ,引起该测量误差的因素有 jpeg 图像的压缩(相机默认的格式)、杂散光的影响、虚光效应及灰度图像转换等。总之,成像式亮度测量方法应用在亮度测量尤其是在测量相对亮度方面是可行的,该方法可以推广用于太阳模拟器均匀性的测量(保证相机不饱和)与场馆照明均匀性的测量等。

参考文献:

- [1] MOORE T, GRAVES H, PERRY M J, et al. Approximate field measurement for surface luminance using a digital camera[J]. Lighting Res. and Tech., 2000, 32(1): 1-11.
- [2] MEHLIK INANICI. Evaluation of High dynamic range photography as a luminance mapping technique [C]. Berkeley :Lawrence Berkeley National Laboratory, 2004.
- [3] HELKE GABELE. The usage of digital cameras as luminance meters[C]. Germany, Cologne: University of Applied Sciences Cologne, Diploma Thesis, 2006.
- [4] ALEKSANTERI EKRIAS, MARIJUKKA ELOHOLMA, LIISA HALONEN, et al. Road lighting and headlights; Luminance measurements and automobile lighting simulations[J]. Building and Environment, 2008, 43(4): 530-536.
- [5] PAUL E DEBEVEC, JITENDRA MALIK. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs [C]. New York: International Conference Computer Graphics and Interactive Techniques, 2008.
- [6] KRUGER U, SCHMIDT F. The impact of cooling on CCD-based camera systems in the field of image luminance measuring devices [J]. Techno Team Bildverarbeitung GmbH, 2009, 46(4): 252-259.
- [7] WANG Shu-xiao. Review of parameters that influences the accuracy of Imaging-based luminance measurement technology[C]. Beijing :The first tripartite lighting SCITECH forum of China, Japan and Republic of Korea, 2008.
- [8] 顾冰,詹庆旋,祝志强. 利用数码相机测量亮度分布的实验研究[J]. 照明工程学报, 2003, 14(1): 15-18.
GU Bing, ZHAN Qing-xuan, ZHU Zhi-qiang. Research on measurement of luminance distribution using a digital camera[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2003, 14(1): 15-18. (in Chinese with an English abstract)
- [9] 王书晓. 基于数码相机的图像亮度测量技术误差分析[J]. 照明工程学报, 2011, 22(2): 12-15.
WANG Shu-xiao. Error analysis of image based on luminance measurement technology[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2011, 22(2): 12-15. (in Chinese with an English abstract)
- [10] 杨城,良晓霞. 基于校正系统的 LED 显示屏亮度均匀性评估方法[J]. 电子科技, 2010, 23(6): 38-40.
YANG Cheng, LIANG Xiao-xia. Luminance uniformity evaluation for the LED display panel based on the correction system [J]. Electronic Sci. & Tech., 2010, 23(6): 38-40. (in Chinese with an English abstract)
- [11] 张晓舟,郭焯波,郑克哲. 面阵 CCD 用于目标亮度的测量[J]. 应用光学, 1995, 16(2): 45-47.
ZHANG Xiao-zhou, GUO Ye-bo, ZHENG Ke-zhe. Plane array CCD for the measurement of target brightness[J]. Journal of Applied Optics, 1995, 16(2): 45-47. (in Chinese with an English abstract)
- [12] 易斌,米红菊,赵宏伟. 基于 HDR 图像处理的数码相机成像式亮度测量方法[J]. 光学技术, 2012, 38(2): 191-196.
YI Bin, MI Hong-ju, ZHAO Hong-wei. A new method of DSC's imaging luminance measurement based on HDR image processing[J]. Optical Technique, 2012, 38(2): 191-196. (in Chinese with an English abstract)
- [13] 周拥军,赵宝奇,王鹏. CCD 成像型亮度计测量方法研究[J]. 电光与控制, 2010, 17(12): 49-52.
ZHOU Yong-jun, ZHAO Bao-qi, WANG Peng. Study on a measurement method of CCD imaging luminance meter[J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(12): 49-52. (in Chinese with an English abstract)
- [14] 仲跻功,周耀宗,于培诺. GB/T12637-1990 [S]. 北京:国家质量监督检验检疫总局, 1990.
ZHONG Ji-gong, ZHOU Yao-zong, YU Pei-nuo. GB/T 12637-1990[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 1990. (in Chinese)