

文章编号 1004-924X(2008)12-2531-06

光电测量设备光学系统的像面照度均匀性检测

沈湘衡¹, 杨 亮^{1,2}, 贺庚贤¹, 王 力^{1,2}

(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, 10039)

摘要:提出了一种光电测量设备光学系统像面照度均匀性的检测方法。该方法首先对被检设备的 CCD 进行标定, 然后用给出的均匀性检测系统对整机光学系统进行检测。该检测系统利用积分球产生均匀背景光信号, 将光测设备置于积分球通光口处, 利用计算机采集 CCD 图像。根据 CCD 的标定结果, 用两点多段校正算法对采集到的图像进行校正, 通过对校正后的图像进行分析, 得到像面照度的不均匀度。此外, 将图像分为多个区域, 计算各个区域的灰度与像面中心区域灰度的比值, 得出图像的灰度分布, 实现了光电测量设备光学系统像面照度均匀性的室内检测。利用研制的光电测量设备光学系统像面照度均匀性检测系统对某型号光电测量设备进行了检测, 得到了该设备光学系统像面照度不均匀度达到 18.7%, 不满足不均匀度 $\leq 10\%$ 的要求, 应对该光测设备进行重新装调。在重新装调后对该设备进行复检, 得到重新装调后的不均匀度为 6.7%, 像面照度均匀性得到了提高, 验证了该方法的有效性。

关键词:像面照度不均匀度; 光学镜头; CCD 校正; 积分球; 光电测量设备

中图分类号:TH703; TB96 **文献标识码:**A

Measurement of image plane illumination non-uniformity of optical system in photoelectric equipment

SHEN Xiang-heng¹, YANG Liang^{1,2}, HE Geng-xian¹, WANG Li^{1,2}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

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

Abstract: A measurement method was proposed for the image plane illumination non-uniformity of optical system in photoelectric measuring equipment. Firstly, the CCD of photoelectric measuring equipment was calibrated by using an integrating sphere and then, the image plane illumination non-uniformity of whole optical system was measured. For simulating the background of sky, integrating sphere was used to provide an uniform radiant source. The photoelectric equipment was put on the front of integrating sphere, and a CCD image was captured by a computer. After analyzing the image, the image plane illumination non-uniformity of optical system was obtained. For improving the results, the two-point multi-section correction was used to correct the photoelectric response non-uniformity of CCD. Moreover, the corrected image was divided into several sections, and the ratio of average gray in each section to that in center area of image plane was calculated, so that the gray distribu-

收稿日期: 2008-07-29; 修订日期: 2008-10-07.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60507003)

tion was obtained, by which the image plane illumination non-uniformity was measured indoor successfully. Finally, a group of experiment results was offered. In the experiment, a certain type of photoelectric equipment was measured. The imagine planes' illumination non-uniformity of optical system on the photoelectric equipment was 18.7%. Because the imagine planes' illumination non-uniformity was not satisfied with the indicator ($\leq 10\%$), we have the photoelectric equipment re-aligned. And the photoelectric equipment was measured again, the imagine planes' illumination non-uniformity of optical system on the photoelectric equipment was 6.7%. The uniformity of image-forming system on photoelectric measuring equipment was enhanced.

Key words: illumination non-uniformity; optical lens; CCD correction; integrating sphere; photoelectric equipment

1 引言

光电测量设备一般以天空为背景观测远距离空中目标,从背景中对目标进行识别、提取,完成对目标的跟踪测量。由于大气对太阳光的散射作用,光电测量设备的光学系统接收到的通常是均匀背景光信号,目标和背景很容易分离,但是由于各种原因,均匀的背景光信号在光学系统的像面上会形成灰度分布不均的图像,降低了像面照度均匀性,严重时将无法进行目标识别和提取,影响光电测量设备的跟踪测量总体性能。因此,对光电测量设备光学系统像面照度均匀性进行检测具有重要意义。

长期以来,光电测量设备光学系统像面照度均匀性的测量一直没有有效的室内测试手段,通常是将光电测量设备对准晴朗天空,人眼观察电视图像是否均匀。该方法只能进行主观的评价,无量化检测结果,并且耗时费力。本文提出了利用积分球形成均匀光源作为背景,通过对图像灰度分析、处理检测像面照度的方法,有效解决了在室内检测光电测量设备光学系统像面照度均匀性的难题。

2 像面照度不均匀的原因

造成光学系统像面照度不均匀的原因主要有以下几种:

(1)远轴光线有一部分被入射窗遮拦,造成像面照度不均匀^[1];

(2)进入光学系统的光线在镜头、镜筒、机体内壁形成反射产生的杂光影响像面照度均匀性^[2];

(3)光学系统内部结构存在遮挡,如滤光片位置不正确造成拦光,也能导致像面照度不均匀;

(4)CCD 安装位置不当造成的像面照度不均匀。例如:CCD 安装位置偏离或超出入射光锥范围(如图 1),CCD 安放位置偏离焦面(如图 2),CCD 与焦面不平行(如图 3)等。

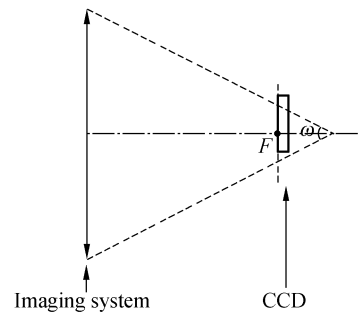


图 1 CCD 安装位置偏离
Fig. 1 CCD position deflected

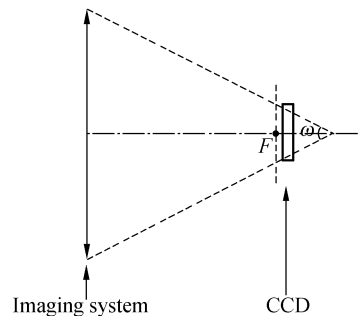


图 2 CCD 位置偏离焦面
Fig. 2 CCD out of image plane

由于造成像面照度不均匀的主要原因基本发生在光学系统的装调过程,因此应当建立合理的室内检测方法,检验和控制光学系统的像面照度均匀性。

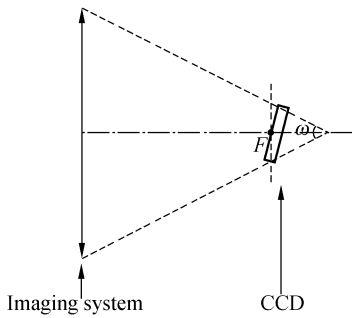


图 3 CCD 与焦面不平行

Fig. 3 CCD unparallel with imagine plane

3 检测方法

光电测量设备光学系统像面照度均匀性的检测分为两步,首先利用积分球通光口处的均匀面光源对该设备的 CCD 进行标定,然后将 CCD 装入被测设备光学系统,用研制的光学系统像面照度均匀性检测系统检测该设备光学系统像面照度均匀性。

在室内检测光学系统像面照度均匀性的系统构成见图 4。利用积分球内壁朗伯面形成均匀光作为背景,将被检测的光测设备置于积分球通光口处,通过图像采集卡将光测设备输出的图像信息采集到计算机。为去除随机噪声,将连续采集得到的多幅图像求和取平均后合成一幅图像,根据 CCD 标定结果,采用两点多段线性校正算法对图像校正,最后利用检测软件分析校正后的图像,得到光学系统像面照度均匀性的检测结果。

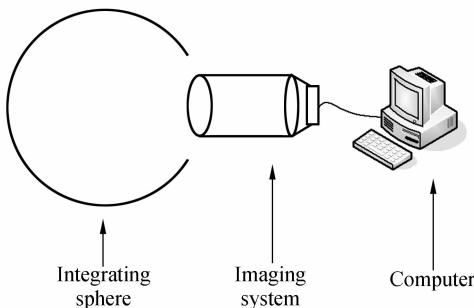


图 4 系统的组成示意图

Fig. 4 System structure

3.1 CCD 标定

由于 CCD 器件具有像素响应不均匀和各个像素暗电流不同的特点,会给测量光学系统像面

照度均匀性带来误差,因此,首先需要对 CCD 标定^[3]。

具体步骤是:

(1)用积分球作为理想面光源对 CCD 进行标定,将 CCD 放置在积分球通光口处,通过图像数据采集卡将图像输入计算机储存并进行处理(如图 5)。为去除噪声,采用多次采图求平均法,即在积分球的每个光亮度下采 100 幅图像,对 100 幅图像求和取平均,合成一幅新的图像作为该亮度下 CCD 的响应灰度图,即得到 CCD 在该亮度下各个像素的响应。

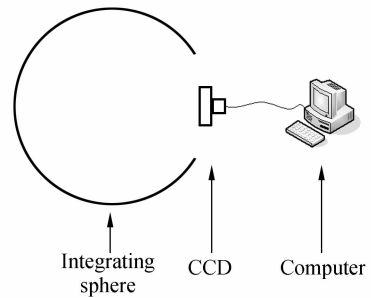


图 5 CCD 标定

Fig. 5 Calibration of CCD

(2)调节积分球光亮度,使 CCD 对不同光强进行响应,获得 CCD 在不同光强下的响应灰度图,作为对 CCD 的标定结果。

3.2 形成均匀背景光

光电测量设备接收到的天空背景光信号主要来源于太阳。一般情况下,白天天空背景光信号分为两部分:一部分是直射太阳光,一部分是大气散射光。光电测量设备对目标探测跟踪时,均避免直接对着太阳方向,所以白天背景光信号主要来自于大气对太阳光的散射^[4]。由于大气散射作用,光测设备对天观测时,在光学系统的视场范围内,各个角度进入光学系统的光线的光强度相同,因此应首先模拟产生均匀的背景光。

积分球为中空球体,球内壁均匀喷涂多层中性漫反射材料。内壁球面任一面元可看作余弦发射体,即发出的辐射通量能球内各点有相同的直射辐照度^[5]。光线在球内多次漫反射,使各个角度通过通光口的光线的光强度相同。

本系统采用的积分球通光口径达到 50 cm, 采用精密数显直流稳流稳压电源为积分球提供电源, 电源输出电压(电流)稳定度可达到 0.01% 读数/3 min, 能为整个系统提供高稳定度的光源。通过改变电源电压可以对积分球光亮度进行调节, 最高亮度可达到 5000 lx。

为了在通光口处获得均匀的背景光, 应保证积分球内的灯源不能直接照射到通光口。

3.3 采集图像及校正

将标定后的 CCD 与光学系统安装组成系统后, 将光学系统置于积分球通光口, 调节积分球亮度, 通过图像采集卡将图像信息采集到计算机, 采用连续采集多幅图像求和取平均的方法去除随机噪声^[6]。

然后利用 CCD 的标定结果, 采用两点多段线性校正算法对采集到的图像校正。根据每个像素点的灰度值选取对应的两幅 CCD 响应灰度图计算校正系数, 利用计算出的校正系数校正该像素点的灰度值。

校正常方程^[7-9]为:

$$y_{ij} = G_{ij} x_{ij}(\phi) + Q_{ij}, \quad (1)$$

式中 G_{ij} 和 Q_{ij} 分别为增益校正因子和偏移量校正因子, x_{ij} 为校正前的输出。

$$V_1 = G_{ij} x_{ij}(\phi_1) + Q_{ij}, \quad (2)$$

$$V_2 = G_{ij} x_{ij}(\phi_2) + Q_{ij}, \quad (3)$$

$$G_{ij} = \frac{V_2 - V_1}{x_{ij}(\phi_2) - x_{ij}(\phi_1)}, \quad (4)$$

$$Q_{ij} = V_1 - G_{ij} x_{ij}(\phi_1). \quad (5)$$

其中, V_1 和 V_2 分别为选取的两幅 CCD 标定灰度图的平均灰度, ϕ_1 和 ϕ_2 为两幅 CCD 标定灰度图对应的积分球的光亮度。

3.4 灰度值分析

用 VC 编写软件处理校正后的图像, 通过直方图观察图像灰度信息。对图像进行分区检测, 计算各个区域的平均灰度与图像中心区域平均灰度的比值, 并计算整幅图像的不均匀度。

3.4.1 将图像分区检测

由于光测设备对天观测时, 远轴光线有一部分要被入射窗遮拦, 会造成像面中心亮度最高, 离

像面中心越远, 亮度越低。所以需要分区, 观察图像各个区域的亮度与像面中心亮度的比值^[10]。

通过软件控制, 可将灰度图均分为任意 $m \times n$ 个区域, 计算各个区域的灰度平均值和图像中心区域的平均灰度值, 并计算各个区域的平均灰度与图像中心区域平均灰度的比值, 用表格保存, 使均匀性判别更为详细直观。

3.4.2 计算图像的不均匀度

不均匀度的计算式为:

$$NU = \frac{1}{V_{\text{avg}}} \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (V_{ij} - V_{\text{avg}})^2}, \quad (6)$$

$$V_{\text{avg}} = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N V_{ij}, \quad (7)$$

其中, NU 为不均匀度, V_{avg} 为图像的平均灰度, M 、 N 分别为图像数据的行数和列数, V_{ij} 表示第 i 行 j 列图像数据的灰度。

4 检测结果讨论

由于采用了高均匀度、高稳定度的积分球作为均匀光源并用两点多段线性校正算法对 CCD 产生的图像进行了均匀性校正, 使测量系统的误差 $< 1\%$, 满足测量精度, 实现了对光电测量设备光学系统像面照度不均匀度的定量检测。

应用该检测系统对某型号光测设备电视光学系统进行了检测, 检测时将像面照度灰度图(图 6(a))均分为 12×12 个区域, 计算每个区域的灰度平均值和图像中心区域(占整个图像面积的 $1/16$)的平均灰度值, 并计算各个区域的平均灰度与图像中心区域平均灰度的比值, 得到了图像灰度的分布信息(见表 1)。

通过计算发现该设备不均匀度较大, 达到 NU 为 18.7%, 不满足不均匀度 $\leq 10\%$ 的要求, 应对该光测设备进行重新装调。图 6(b)为重新装调后该设备的像面照度灰度图, 经复检表明, NU 为 6.7%, 像面照度均匀性得到了提高(见表 2), 验证了该方法的有效性。



图 6 检测结果比较
Fig. 6 Comparison of measurement results

表 1 初次检测各个区域的灰度与图像中心区域灰度的比值

Tab. 1 Ratio of gray value in each section to that value in center image area in the first measurement

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.358	0.480	0.595	0.704	0.787	0.851	0.877	0.870	0.857	0.845	0.825	0.806
2	0.422	0.550	0.672	0.781	0.864	0.902	0.902	0.896	0.883	0.870	0.851	0.825
3	0.473	0.608	0.742	0.851	0.915	0.934	0.940	0.928	0.915	0.896	0.877	0.851
4	0.518	0.659	0.793	0.902	0.953	0.966	0.972	0.960	0.947	0.921	0.896	0.870
5	0.544	0.691	0.832	0.934	0.972	0.985	0.992	0.985	0.966	0.940	0.915	0.883
6	0.563	0.710	0.845	0.947	0.985	0.992	0.998	0.992	0.979	0.953	0.921	0.896
7	0.563	0.710	0.851	0.953	0.985	0.998	1.004	0.998	0.985	0.960	0.928	0.902
8	0.544	0.697	0.832	0.940	0.985	0.998	1.004	0.998	0.979	0.953	0.928	0.896
9	0.512	0.659	0.800	0.908	0.972	0.985	0.985	0.979	0.960	0.940	0.915	0.883
10	0.473	0.608	0.742	0.857	0.940	0.960	0.966	0.953	0.940	0.921	0.896	0.870
11	0.416	0.550	0.678	0.793	0.883	0.928	0.934	0.928	0.915	0.896	0.877	0.851
12	0.352	0.473	0.601	0.717	0.806	0.870	0.896	0.896	0.889	0.870	0.857	0.838

表 2 复检各个区域的灰度与图像中心区域灰度的比值

Tab. 2 Ratio of gray value in each section to that value in center image area in the second measurement

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0.759	0.799	0.816	0.828	0.839	0.851	0.845	0.839	0.828	0.805	0.765	0.696
2	0.811	0.834	0.845	0.862	0.874	0.880	0.880	0.874	0.862	0.845	0.822	0.770
3	0.839	0.862	0.880	0.897	0.908	0.914	0.914	0.903	0.891	0.874	0.851	0.822
4	0.862	0.885	0.908	0.926	0.937	0.949	0.949	0.937	0.920	0.897	0.874	0.851
5	0.880	0.908	0.931	0.954	0.972	0.977	0.977	0.966	0.943	0.926	0.897	0.868
6	0.897	0.926	0.954	0.977	0.989	0.995	0.995	0.983	0.966	0.937	0.908	0.885
7	0.908	0.937	0.966	0.989	1.000	1.006	1.006	1.000	0.977	0.949	0.920	0.891
8	0.914	0.943	0.972	0.995	1.006	1.012	1.012	1.000	0.983	0.954	0.926	0.897
9	0.908	0.937	0.966	0.989	1.006	1.012	1.006	0.995	0.977	0.949	0.920	0.891
10	0.897	0.926	0.949	0.966	0.983	0.989	0.983	0.972	0.954	0.931	0.908	0.880
11	0.880	0.903	0.926	0.943	0.960	0.966	0.960	0.949	0.931	0.914	0.891	0.862
12	0.862	0.880	0.903	0.920	0.931	0.937	0.931	0.920	0.908	0.891	0.868	0.839

5 结 论

通过分析和实际检测,证明上述方法可以实现光电测量设备光学系统像面照度均匀性的室内测量。由于采用了高均匀度、高稳定度的积分球作为均匀光源模拟天空背景并用两点多段线性校

正算法对 CCD 产生的图像进行了均匀性校正,实现了对光电测量设备光学系统像面照度不均匀性的定量测量。通过将图像分为多个区域,计算各个区域的灰度与像面中心区域灰度的比值,得出图像的灰度分布,全面地检测了光电测量设备光学系统像面照度均匀性。

参考文献:

- [1] 郝道银. 光学工程[M]. 北京:机械工业出版社.
YU D Y. *Optics Engineering* [M]. Beijing: Publishing House of Mechanics Industry. (in Chinese)
- [2] 吴国栋,张晓辉,韩昌元,等. 空间 CCD 相机辐射标定方法的应用研究[J]. 测试技术学报,2004,18(4):325-329.
WU G D, ZHANG X H, HAN CH Y, *et al.*. Radiometric calibration of the space CCD camera[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2004, 18(4): 325-329. (in Chinese)
- [3] 凌伟,王志乾,高峰端. 光电测量系统畸变的实时数字校正[J]. 光学 精密工程,2007,15(2):277-282.
LING W, WANG ZH Q, GAO F D. Real time digital correction for distortion in photoelectronical measuring system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(2): 277-282. (in Chinese)
- [4] 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.
JIN W Q, HU W J. *Measure in Spectral Radiance, Luminosity and Chromaticity* [M]. Beijing: Publishing House of Beijing Institute of Technology. (in Chinese)
- [5] 黄建余. 天空背景亮度仿真研究[J]. 飞行测控学报,2008,27(1):61-64.
HUANG J Y. Background brightness simulation of daytime sky[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2008, 27(1): 61-64. (in Chinese)
- [6] ZHANG Q. Nonuniformity measurement of group 1 infrared imaging system [J]. *SPIE*, 1998, 3553: 275-279.
- [7] 薛利军,李自田,李长乐,等. 光谱成像仪 CCD 焦平面组件非均匀性校正技术研究[J]. 光子学报,2006,35(5):693-696.
XUE L J, LI Z T, LI CH L, *et al.*. Study on the hyper-spectral CCD imager nonuniformity correction algorithm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(5): 693-696. (in Chinese)
- [8] 陈迎娟,张之江,张智强. CCD 像素响应不均匀性的校正方法[J]. 光学 精密工程,2004,12(2):216-220.
CHEN Y J, ZHANG ZH J, ZHANG ZH Q. Correction of CCD pixel nonuniformity[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(2): 216-220. (in Chinese)
- [9] 代少升,袁祥辉. 红外图像非均匀性实时校正的新技术[J]. 光学 精密工程,2004,12(2):201-204.
DAI SH SH, YUAN X H. Real-time correction of infrared image nonuniformity [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(2): 201-204. (in Chinese)
- [10] 赖作镁,王敬儒,张启衡. 背景运动补偿和假设检验的目标检测算法[J]. 光学 精密工程,2007,15(1):112-116.
LAI Z M, WANG J R, ZHANG Q H. Object detection algorithm based on background motion compensation and hypothesis test[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 112-116. (in Chinese)

作者简介:沈湘衡(1952—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要研究方向为光电测量设备精密检测技术和方法研究。E-mail: shenxiangheng@yahoo.com.cn