

用于投影显示的离轴照明系统设计

张增宝¹, 盛益强², 翁志成¹, 张 新¹, 丛小杰¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光学技术中心, 吉林 长春 130033;

2. 南开大学 现代光学研究所, 天津 300071)

摘 要:提出了一种新型离轴照明系统,它由一个半球—椭球型反射镜、一个双曲面反射镜和一个倾斜的匀光杆组成。半球—椭球型反光镜收集灯弧发出光能,双曲面反光镜将光束再次聚焦到匀光杆的前端面。用 LightTools 软件建模的结果显示,当光调制器尺寸为 1.4 或 1.3 m 时,在满足高均匀性的前提下,光收集率能够提高 20 %。

关键词:反光镜; 照明系统; 投影显示; 光学扩展量; 收集率

中图分类号: TN21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)03-0316-04

Off-axis illumination system design for projection display

ZHANG Zeng-bao¹, SHENG Yi-qiang², WENG Zhi-cheng¹, ZHANG Xin¹, CONG Xiao-jie¹

(1. Changchun Institute of Optics Fine Machine and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;

2. Modern Optics Institute, Nankai University, 300071 Tianjin, China)

Abstract: A novel off-axis illumination system has been developed to collect and focus light from an arc lamp onto the imager. The system consists of a sphere-ellipsoidal reflector, a hyperboloidal reflector and a tilted light pipe. The sphere-ellipsoidal reflector synthesizes two main light beams and focuses the light to reduce the etendue value. The hyperboloidal reflector transforms the shape of beam into a tilted light pipe to gain high collection efficiency and uniformity. The modeling result obtained by LightTools and ZEMAX shows that the system can illuminate the small imagers with high uniformity and collection efficiency.

Key words: Reflector; Illumination system; Projection display; Etendue; Collection efficiency

0 引 言

根据 2002 年 Stanford Resources 的预测,全球

投影显示市场从 1998 ~ 2005 年,总值将从 72.2 亿美元增长到超过 178 亿美元,并将广泛用于商务、教育及娱乐等领域。随着投影显示技术的发展,空间光调制器的尺寸越来越小而像素数越来越高。这些特性

收稿日期:2003-08-20; 修订日期:2003-10-11

作者简介:张增宝(1976-),男,河北保定人,博士,主要从事光学设计、投影显示光学引擎研究。

使得投影显示技术能够满足下一代数字投影显示技术所要求的低成本、高解析度的特点。LCoS 和 DLP 技术是在成熟的集成电路技术基础上发展起来的空问光调制技术。因此随着成品率的提高,这种大规模生产的优势将会得到充分发挥。空问光调制器尺寸减小及消费者期望更大投影尺寸的双方面共同作用,要求光学引擎中照明系统的效率更高。事实上,亮度正是大屏幕投影显示的限制因素。传统的照明系统设计基于对称的点光源理论,发光体的光学扩展量放大了数十倍。文中基于非成像光学理论提出一种非对称的照明系统设计方法,利用成像光学理论在平衡像差时充分利用了两个非球面反光镜所提供的优化自由度。

1 传统椭球 - 方棒照明系统

典型的短弧灯及其辐射模型如图 1 所示,通常,辐射强度的分布成蝶型,绝大多数的辐射是垂直于灯弧方向的,在投影显示系统中理想的光源是长寿命、高发光效率、较短弧长、色温好和价格低。随着光源功率的增加,弧长会相应地增加,这与提高光利用率、减小光源光学扩展量相矛盾。

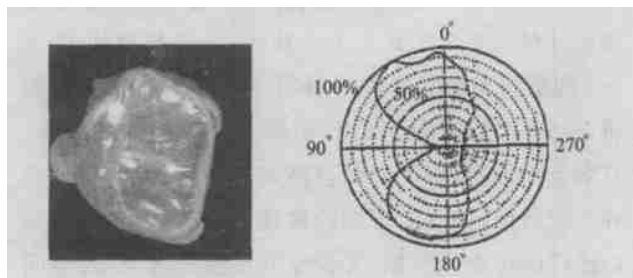


图 1 典型的短弧灯及其辐射分布图

Fig. 1 Representative arc lamp and radiation pattern

椭球 - 方棒系统是一种经典的均匀照明方法,它将输出的圆光斑转化成照明空问光调制器需要的矩形光斑,同时保证系统的光能利用率和照明均匀性,因其结构简单、造价低廉、高效率、高均匀性,在投影显示中已经得到了广泛的应用。如图 2 所示,将短弧灯沿光轴放在旋转椭球面反射镜的内焦点上,匀光杆放在反射镜的第二焦点附近,光线进入匀光杆经多次反射,在杆的末端形成均匀的照明。然后通过转向透镜成像到 LCD、LCoS 或 DLP 等空问光调制器上,而后被缩放到与空问光调制器的尺寸和投影镜头的 $F/\#$

相匹配。

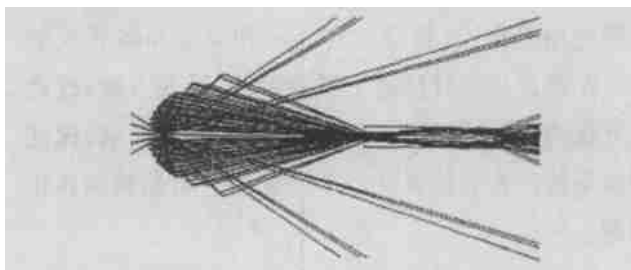


图 2 利用 LightTools 软件光线追迹椭球 - 方棒照明系统

Fig. 2 Ray trace of traditional elliptical illumination system by LightTools software

利用 LightTools 软件对经典的椭球 - 方棒照明系统进行建模分析,在方棒前端面上得到的光强分布如图 3 所示。当光束被反光镜反射到匀光杆前端面时,绝大多数的光能集中在以光轴为中心的圆面中,其中大部分的能量集中在中心的一个较小的面积里,而外围能量较少且对应着一个很大立体角,正是外围的这部分能量使系统总的光学扩展量增大,其原因是灯弧被反光镜反射成像时引起的相差(主要是球差)大大扩展了光源的光学扩展量。

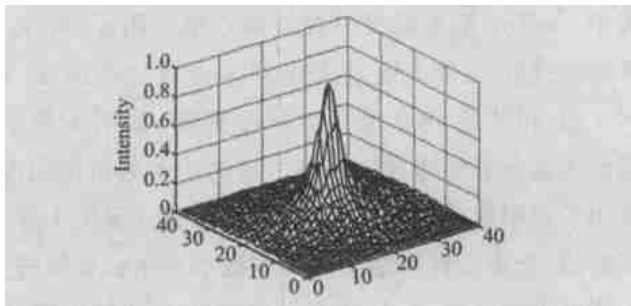


图 3 方棒输入端的照明分布

Fig. 3 Intensity of the input of the traditional elliptical system

根据非成像光学理论,光学扩展量可以近似成:

$$E = \text{Area} \times \text{Angle}(\text{solid})$$

由于光源发光角分布的不均匀性和发光体的体积影响,光源经过标准椭球面反射以后,光学扩展量增加很快。因此,传统的椭球 - 方棒照明系统只能提供一个低光强而大光学扩展量的照明,而下一代空问光调制器的小尺寸、高解析度要求照明系统有更小的光学扩展量,同时保证很高的光能利用率和均匀性。通过分析发现可以从两方面来改进传统的椭球 - 方棒照明方案。一方面,对于光源设计,减小弧长能够实现现在保证一定的光效率前提下,满足未来更小尺寸

的光调制器的照明要求,但是减小光源弧长难以提高光源使用寿命,有报道 0.7 mm 和 0.5 mm 弧长的 100 W 超高压汞灯已处于试验阶段;另一方面,改进反光镜的设计,以减小灯弧成像时的像差影响,保证提供系统的光学扩展量与小尺寸的空间光调制器相匹配。

2 新型反光镜的设计

为了得到高效率高均匀性而低光学扩展量的照明系统,提出了一种新的离轴照明系统设计。如图 4 所示,将短弧灯沿光轴放在半椭球面反射镜的内焦点上,对面放置一个半球面反射镜,根据点点成像原理,短弧灯在反射镜的第二焦点上成像。用一个半双曲面反射镜重新调整光束形状,同时平衡系统的像差。将方棒放在半双曲面反射镜的另一焦点附近,使其相对于轴线的倾斜角为:

$$\alpha = \arctan \left(\frac{1 - e^2}{2e} \right)$$

式中 e 为半双曲面反射镜的离心率。用 α , β , γ , e 来增加优化变量。通过优化程序选取适当的 α , β , γ , e 值,可将空间立体角 α 减小到零,如图 4 所示。因此大部分光能也就集中在方棒的小入射角范围内,减小了照明面的空间立体角。另外,通过采用半球面反射镜,光束在传输途中的面积减小一半。光线进入方棒经多次反射,在杆的末端形成均匀的矩形照明,再通过转向透镜成像到 LCD、LCoS 或 DLP 等空间光调制器上,然后被缩放到与空间光调制器的尺寸和投影镜头的 $F/\#$ 相匹配。

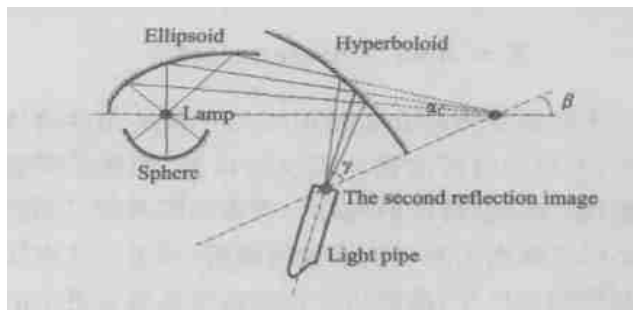


图 4 改进的离轴反光镜

Fig. 4 Schematic diagram of improved reflector system

另一方面,为了实现最大程度的光能收集,通过调整椭球和双曲面的 R_0 和 e 值及其 α 、 β 、 γ 三个角度参数,在保证较小的光学扩展量基础上可实现输出照明到方棒前端面的形状调整,与矩形的空间光调制器相匹配。改进后离轴照明的光强输出如图 5 所示。

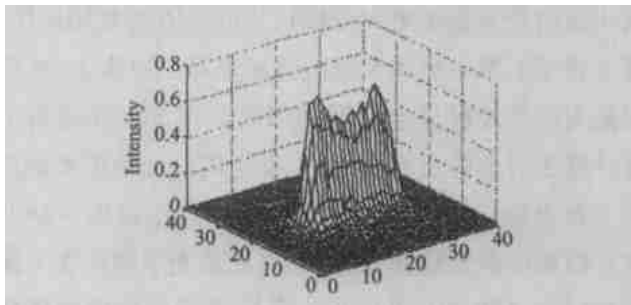


图 5 改进后离轴照明的光强输出

Fig. 5 Intensity of the output of the improved reflector system

3 光收集效率和照明均匀性

为了对比离轴反光镜与传统方案在光收集效率上的不同,利用 LightTools 和 ZEMAX 软件分析了两种照明方案。第一种照明系统光源采用弧长 1.0 mm 的 120 W 标准 UHP 灯,在保证空间光调制器上的照明均匀性大于 90 % 的条件下,用不同的方棒组和设计对 3.3、2.3、2.0、1.4 和 1.3 cm 模拟的 $F/\# = 2$ 的空间光调制器进行照明,实现 14 张角远心照明,得到一组数据后作图,如图 6 上面的曲线所示。其余条件不变,将反光镜替换成离轴设计后,得到另外一组数据,如图 6 下面的曲线所示。计算过程中,LightTools 中光线数、光源空间位置光强分布、空间角度光强分布、接收器网格数等参数保持不变。图 6 示出在相同的条件下,改进后的离轴反光镜设计随着空间光调制器尺寸的减小,光收集效率等性能参数明显提升。

4 结 论

在匀光杆照明系统的研究中,系统的光学效率和光学扩展量是两个主要问题,在保证效率的前提下,使照明系统的光学扩展量同光调制器的光学扩展量相匹配是问题的关键,利用 LightTools 建模分析的结果显示,离轴照明系统可提高系统的光利用率,特别是对于小尺寸的空间光调制器,如 2.3、2.0、1.4 和 1.

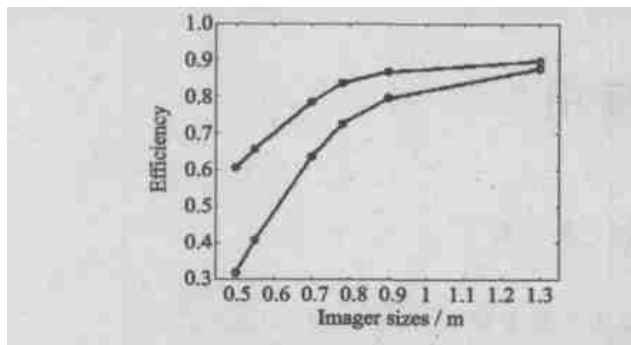


图6 光收集效率与空间光调制器尺寸关系曲线

Fig.6 Relation curves of collection efficiency and panel sizes

3 cm 的面板。同时这种改进的系统在其他条件相同的情况下照明更加均匀,使系统向着高效率、高均匀性、小的光学扩展量的方向发展,解决了光调制器件由于尺寸减小给照明系统设计带来的问题。但是椭圆双曲二次成像型方棒照明系统的缺点是结构较复杂,满足实用性要求、降低工艺难度和价格是下一步要解决的主要问题。

参考文献:

- [1] Benjamin A Jacobson, Robert D Gengelbach. Beam shape transforming devices in high-efficiency projection systems [A]. SPIE [C]. 1997, 3139:141-150.
- [2] 张增宝,翁志成,丛小杰,等.液晶背投影电视中蝇眼透镜阵列照明系统的设计[J]. 光学精密工程, 2002, 10:126-129.
- [3] Benjamin A Jacobson, Robert D Gengelbach et al. Metal halide lighting systems and optics for high efficiency compact LCD projectors [A]. SPIE [C]. 1998, 3296:33-40.
- [4] Optical Research Associates. LightTools Illumination Module User's Guide [M]. 1997.
- [5] Jin-Chou Yoo, Chien-Ping Kung, et al. Compact projection optical engine [A]. SPIE [C]. 1998, 3296:46.
- [6] Leon Shapiro, New ANSI/IEC standard for projectors [A]. SPIE [C]. 1996, 2650:209.
- [7] Iwai J I. Illumination system using Rod-Type integrator [J]. SID, 1998, 721.

(上接第 306 页)

为红外图像序列经过 10 帧累加后的结果,累加后灰度最高的位置就是目标对应的位置。图 3(d)为使用门限分割结果,准确地检测出小目标的位置。

4 实验分析及结论

实验结果表明,提出的动态规划算法在规定的虚警和检测概率下,不但能解决以背景为标准的高斯噪声,信噪比小于 3 的复杂图像中小目标检测的问题,而且也能准确检测出复杂背景下红外图像中的小目标。动态规划算法是穷举法的一种替代,它不仅减少了计算量,而且鲁棒性、并行性好,易于硬件实现,是低信噪比条件下小目标检测的可行方法。

参考文献:

- [1] Yair Barniv. Dynamic programming solution for detection dim moving

- targets [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1985, 21 (1):144-156.
- [2] Johnston L A, Krishnamurthy V. Performance analysis of a dynamic programming track before detection algorithm [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2002, 38(1):228-242.
- [3] Tarun Soni, Walter H Ku. Performance evaluation of 2-D adaptive prediction filter for detection of small objects in image data [J]. IEEE Trans on Image Processing, 1993, 2(3):327-339.
- [4] James Arnold, Scott Shaw. Efficient target tracking using dynamic programming [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(1):44-56.
- [5] Reed I, Gagliardi R, Atotts L. A recursive moving-target-indication algorithm for optical image sequences [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1990, 26(3):434-440.
- [6] Yair Barniv. Dynamic programming solution for detection dim moving targets part II: analysis [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1987, AES-23(6):776-778.