

基于微透镜阵列的 DMD 芯片投影系统照明优化

李 丹¹ 薛芸芸¹ 曹 雯¹ 姚连芳¹ 石会双¹ 郭海成² 张宝龙^{1,3}

¹ 天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222
² 香港科技大学显示技术研究中心, 香港 九龙
³ 天津峰景光电科技有限公司, 天津 300222

摘要 分析了照明系统中微透镜阵列的入射光线角度及系统像差对光学利用率的影响,提出了通过修正相关参数来优化照明系统的光学利用率以及照明均匀性的方法。通过改变用于光源聚光的自由曲面透镜的面型来缩小入射角度,从而减小了由于大角度扩散造成的效率损失。并且在微透镜阵列后采用两个球面透镜代替傅里叶透镜作为积分镜片,不仅成本低廉,而且在控制像差方面更为灵活。参数优化后,设计方案的光学利用率可达60.51%,均匀性可达94.24%,验证了理论分析的可行性和有效性。

关键词 光学设计;照明系统;微透镜阵列;均匀性;数字微镜器件

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0122002

Optimization of DMD Illumination System with Microlens Array

Li Dan¹ Xue Yunyun¹ Cao Wen¹ Yao Lianfang¹ Shi Huishuang¹
Kwok Hoising² Zhang Baolong^{1,3}

¹ College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China
² Center for Display Research, Hong Kong University of Science and Technology, Kowloon, Hong Kong, China
³ GianTOptics Technology Limited, Tianjin 300222, China

Abstract With the analysis of incident angle and system aberration of microlens array, which would affect the illumination efficiency of the optical system, the optical efficiency and illumination uniformity are optimized. The efficiency loss which is caused by large incident angle is minimized by varying the curvature radius of the free-form double-lens. Two spherical lenses are used as Fourier integrator after the microlens array to increase the system efficiency. The simulation result shows that the optical efficiency and illumination uniformity are 60.51% and 94.24%, respectively, which proves the feasibility of the theoretical analysis.

Key words optical design; illumination system; microlens array; uniformity; digital micromirror device

OCIS codes 220.4298; 220.1010; 220.2945

1 引 言

目前市场中主流微型投影机采用的微显示芯片有数字微镜器件(DMD)、液晶显示屏(LCD)、硅基液晶(LCoS)等,其中DMD以其高清晰度、高亮度、色彩鲜艳等特点备受市场欢迎^[1]。光引擎主要由两部分组成,即照明系统和成像系统。伴随着投影机市场的

微型便携化的趋势以及光源的改革,市场对照明系统在结构和效果上也提出了更高要求,紧密型结构成为一项关键的技术要求。

本文在照明系统中采用了双排微透镜阵列和两个球面镜的结构,达到了结构紧密、照明均匀的效果。通过控制微透镜阵列入射光线角度的大小,减

收稿日期: 2012-08-21; 收到修改稿日期: 2012-09-19

基金项目: 国家科技部科技型中小企业技术创新基金(11C26211203966)资助课题。

作者简介: 李 丹(1977—),女,博士,副教授,主要从事现代显示技术方面的研究。E-mail: lidan@tust.edu.cn

小了由于大角度入射造成的光能损失,并采用两个球面镜作为中继镜,在照明系统中引入成像设计的理念,校正照明系统中的球差等像差,对照明亮度及均匀性的提高起到了很大作用。

2 微透镜阵列的照明特性

在照明系统中,光线经过第一排微透镜阵列在第二排上成像,宽光束被分为多个细光束,每个细光束相比宽光束而言均匀性都有所提高,这些细光束作为二次光源经过后面的聚光镜叠加,补偿了其均匀性中的微小差别,得到均匀的照明光斑。图1为微透镜阵列系统结构,其中 P_{mla} 为微透镜对角线长度, D 为DMD对角线长度, f_{mla} 和 f_{rl} 分别为微透镜阵列和 relay lens 的后焦距^[2]。

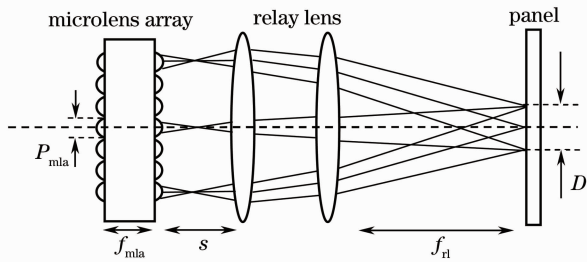


图1 微透镜阵列照明系统结构图

Fig. 1 Schematic of microlens array illumination system

3 照明系统整形分析模拟

3.1 光线入射角度对照明系统的影响分析

3.1.1 光线入射角度的影响

当光线入射角过大时,入射光线照射到第一排微透镜阵列后,经过折射不能成像在对应的第二排微透镜范围内,而是呈发射状出射,在目标光斑(DMD 面板照明面)周围形成杂散光斑,因而降低了微透镜阵列的光学利用率^[3,4],如图2所示。为了提高效率,可以通过修改自由曲面透镜的面型,减小小光束入射角度,或者根据光学拓展量守恒定理^[5]

$$E = \pi A_s \sin^2 \theta \quad (1)$$

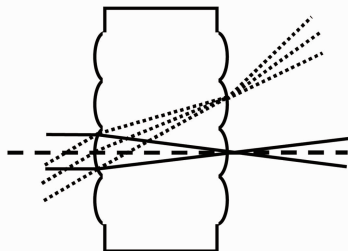


图2 大角度入射光路示意图

Fig. 2 Schematic of light beam incident in wide-angle

适当增加数值孔径的大小。(1)式中 A_s 为光斑面积, θ 为光线入射角,根据设计规格,增大数值孔径即减小 F 数

$$F = \frac{1}{2 \tan \theta}, \quad (2)$$

这样就意味着缩小了光斑面积。为保持照射到微显示器上的有效面积,则需适当增加焦距 f ,但结构长度随之增加。因此,设计过程中应权衡各项参数,优化设计。

3.1.2 自由曲面透镜的优化

自由曲面透镜^[6]以广义泛函理论为设计依据,透镜为中心对称实体,它的轮廓线为一条离散点组成的自由曲线,该曲线无法用数学解析式表达。自由曲面透镜可以实现输出角 γ 与光源出射角 θ 之间给定的泛函相关性。

图3中输出角 γ 与光源出射角 θ 之间的函数关系可以表示为

$$\gamma(\theta) = \theta - \beta + \beta', \quad (3)$$

式中 β 和 β' 分别为相对于本地曲面法线逆时针测量的入射和折射光线角度。采用斯涅耳定律从上述方程中消除 β' ,可以求解出 β 为

$$\beta(\theta) = \arctan \left\{ \frac{n' \sin[\theta - \gamma(\theta)]}{n \cos[\theta - \gamma(\theta)] - n} \right\}, \quad (4)$$

从而得到在折射表面所需的入射光线角关于光源出射角 θ 的方程式。上述方程中 n 和 n' 分别是光学表面入射和折射一侧的折射率。优化入射微透镜阵列的光线角度即增大 β 角,减小 γ 角。

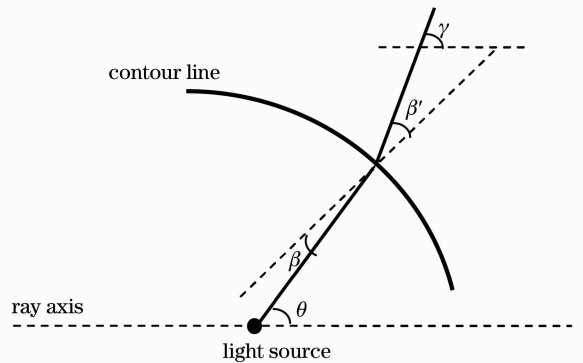


图3 自由曲面透镜设计示意图

Fig. 3 Schematic of free-form optical lens design

3.1.3 仿真模拟

经过 TracePro 软件模拟,优化入射角前后的DMD 投影系统在DMD 面板处照明效果对比如图4所示。图4中较为明亮的白色光斑方框为大于DMD 面板面积10%的溢出光斑,此光斑内为DMD 的有效面积。图4(a)为优化前 15° 入射,由于大角度造成的折射光线偏移,在白色光斑方框两侧形成

了灰色杂散光斑,能量损失为 20.326%,图 4(b)为优化后 12°角入射,光线被有效利用,由第一排微透镜阵列分割的光束对应地成像在第二排上,能量损失仅为 10.16%,效率显著提高。

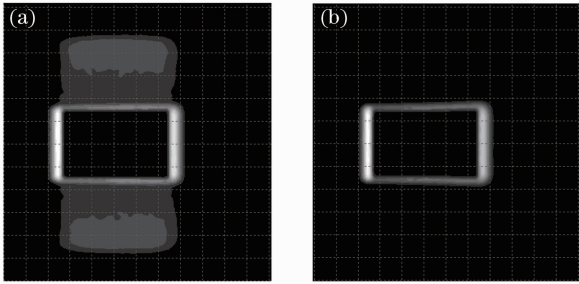


图 4 不同角度入射光照效果。(a)大角度;
(b)小角度入射光照效果

Fig. 4 Illumination map of incident light with different incident angles. (a) Wide-angle; (b) small-angle

3.2 成像像差对照明系统性能的影响分析模拟

一般在有效口径较大、结构紧凑的照明系统中,需要快速地将光源光斑面积减小到微显示器件的有效面积。这时要求中继镜有较短的后焦,这将不可避免地引入大像差,降低微透镜阵列照明系统的光学利用率^[7]。根据成像像差理论分析,球差、彗差、像散较大则会影响弥散斑的大小和形状,造成画面边缘模糊,亮度降低;场曲和畸变则造成像面的变形,使得由微透镜阵列产生的二次光源在叠加时,像差相互叠加,造成照明的不均匀,且边缘视场最为明显。

由图 5 不难看出,边缘视场像差对照明系统的光学利用率影响明显,而中心视场则不明显。因此优化

过程中应该放宽对中心视场的成像要求,着重注意各像差边缘视场成像质量^[8]。利用 Zemax 软件优化两个球面透镜的像差,为得到锐利的边缘效果,实验设计边缘视场弥散斑直径应在 0.3 mm 以内,中心视场弥散斑直径应在 0.04 mm 以内。

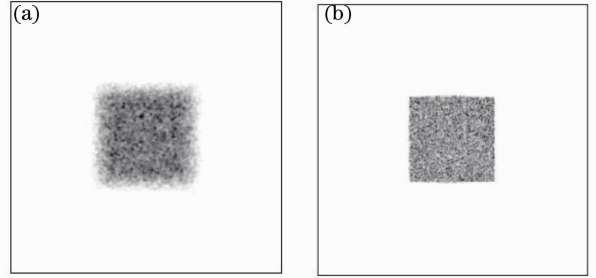


图 5 像差校正前后光斑形状。(a)初始光斑;
(b)优化后光斑

Fig. 5 Light spot before and after aberration correction. (a) Original form; (b) optimized form

4 结构优化模拟

根据以上基本思路,分析了入射角度及大像差对照明系统中光学利用率的影响,提出了一组优化后的设计方案。中继镜由两个球面透镜来代替傅里叶透镜,这样更容易校正像差,也使得在短距离中可以快速降低像高而避免大像差的产生,而且相较傅里叶透镜而言,两个球面透镜的设计难度较低,像差更易调节,成本也大大减小。

设计选用 0.45 inch (1 inch = 25.4 mm) DMD, Luminus 公司的 PT39 LED。光源经过自由

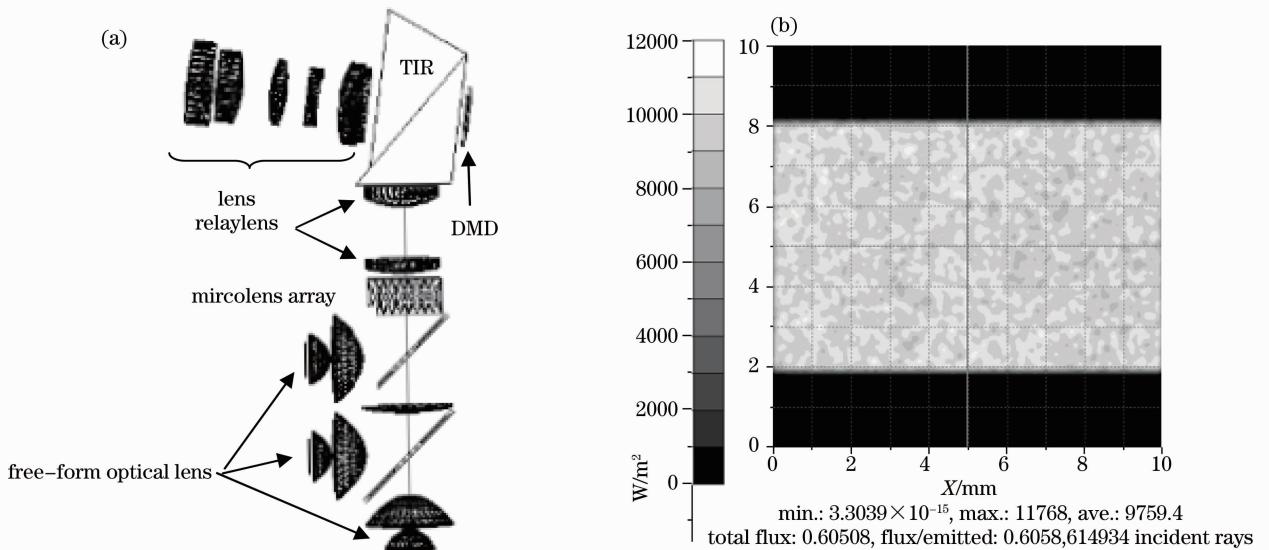


图 6 优化后的(a)光引擎结构和(b)DMD处照明效果图

Fig. 6 Optimized (a) structure of optical engine and (b) illumination map on DMD

曲面透镜将光线收束到 5° 以内,小角度入射到微透镜阵列。微透镜单元的面积和面板有效面积的比例为 1:5,此时匀光效果最优^[9]。根据光学拓展量守恒原理,微透镜阵列的 F 值为 2.6。图 6 为优化后系统结构图及照明效果。优化后 DMD 面板处的照明效果分布均匀,照明效率高达 60.51%,在实验应用中投射效果明亮。

将投影机的光学均匀性定义为

$$u = \frac{P_{\text{corner}}}{P_{\text{center}}} \times 100\%, \quad (5)$$

式中 P_{corner} 为 4 个角亮度的平均值, P_{center} 为中心亮度值。根据图 5 可以计算出该系统的均匀性为 94.24%。下表为优化前后光引擎参数对比。

表 1 优化前后光引擎参数

Table 1 Parameters of optical engine before and after optimization

	Before optimization	After optimization
Size /mm	120×100×25	95×70×25
Efficiency /%	54.33	60.51
Uniformity /%	85.12	94.24

5 结 论

分析了照明系统中微透镜阵列的入射光线角度及系统像差对光学利用率的影响。使用自由曲面透镜作为光源聚光镜,通过计算修改透镜面型,缩小光束入射微透镜阵列角度,增大光学集光比并且减小了由于大角度扩散造成的效率损失。在微透镜阵列后采用两个球面透镜作为中继镜,更为灵活地控制照明系统中的像差,优化有效光斑面型,提高了光学利用率及均匀性。所讨论的 DMD 照明系统采用 0.45 inch 的 DMD 面板,对应的微透镜尺寸设计为 1.97 mm×1.34 mm(11×11 阵列),球面半径为 3.75 mm。边缘视场弥散斑直径控制在 0.3 mm 以

内,中心视场弥散斑直径控制在 0.04 mm 以内。优化后,设计方案光学利用率可达 60.51%,均匀性可达 94.24%。

参 考 文 献

- 1 J. W. Pan, C. M. Wang, H. C. Lan *et al.*. Homogenized LED-illumination using microlens arrays for a pocket-sized projector [J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(17): 10483~10491
- 2 I. Glaser. Applications of the lenslet array processor[C]. *SPIE*, 1983, **564**: 180~185
- 3 Yin Zhiyong, Wang Yuefeng, Jia Wenwu *et al.*. Performance analysis of beam integrator system based on microlens array[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(7): 0702007
殷智勇,汪岳峰,贾文武等.基于微透镜阵列的光束积分系统的性能分析[J].中国激光,2012,**39**(7): 0702007
- 4 Sun Yanjun, Leng Yanbing, Chen Zhe *et al.*. Square aperture spherical microlens array for infrared focal plane [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(4): 399~403
孙艳军,冷雁冰,陈哲等.用于红外焦平面的正方形孔径球面微透镜阵列研究[J].光子学报,2012,**41**(4): 399~403
- 5 R. Winston. *Nonimaging Optics*[M]. Bellingham: SPIE Press, 1995
- 6 Jiang Cheng, Jiang Lei. Research in free-form lens for general illuminating[J]. *J. Fudan University (Natural Science)*, 2010, **49**(1): 81~87
江程,江磊.自由曲面照明透镜的应用研究[J].复旦学报(自然科学版),2010,**49**(1): 81~87
- 7 M. Born, E. Wolf. *Principles of Optics* (7th ed.) [M]. Yang Jiasun Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. 192~217
M. 玻恩, E. 沃尔夫. 光学原理(第七版)[M]. 杨葭荪译. 北京: 电子工业出版社, 2009. 192~217
- 8 Zhu Xianchang, Wu Fan, Cao Xuedong *et al.*. Analysis of focus dislocation induced by the microlens array measuring based grating diffraction [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 1112010
朱咸昌,伍凡,曹学东等.光栅衍射法测量微透镜阵列焦距时产生的光斑干扰分析[J].光学学报,2011,**31**(11): 1112010
- 9 Kuang Lijuan, Zhai Jinhui, Ruan Yu *et al.*. Characteristics of fly-eye lens in uniform illumination system [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, **3**(6): 29~31
匡丽娟,翟金会,阮玉等.复眼透镜阵列应用于均匀照明系统的特性研究[J].光学与光电技术,2005,**3**(6): 29~31

栏目编辑: 韩峰