

文章编号: 0253-2239(2004)05-587-5

复眼透镜提高液晶投影照明系统的能量利用率

周 平 陆 巍 林宇翔 郑臻荣 李海峰 顾培夫
(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 照明系统是液晶投影机的重要组成部分,它将直接影响到投影仪的光能利用率以及色彩等系统性能。对于复眼照明系统,复眼透镜的良好设计可以大大提高系统的能量利用率。在对液晶投影照明系统的原理进行分析的基础上,提出了两种复眼透镜的设计方案。两种方案均采用矩形子复眼,便于设计和加工。通过对复眼透镜中每个子复眼进行偏心以及改变其形状大小来提高系统能量利用率。计算机模拟结果表明,两种设计方案与传统设计相比,在光能利用率上分别提高了 16.5% 和 26.3%,并且具有较高的均匀性。最后,还对两种复眼透镜的设计方案进行了分析和比较。

关键词: 应用光学; 光学设计; 复眼透镜; 偏振光分离器; 光能利用率; 均匀性
中图分类号: TN94 文献标识码: A

Fly Eye Lens Array Used in Liquid Crystal Projection Display with High Light Efficiency

Zhou Ping Lu Wei Lin Yuxiang Zheng Zhenrong Li Haifeng Gu Peifu
(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)
(Received 24 January 2003; revised 05 June 2003)

Abstract: Illumination system is a main part in liquid crystal projection display system, and is important to color fidelity and other performance of a projector. As for fly eye illumination system, the light efficiency would be dramatically increased, if the fly eyes lenses are well designed. Two designs of the fly eye lenses are introduced on basis of the analysis on liquid crystal projection displays. The sub-fly eyes in both designs are all rectangular, so they are easy to design and manufacture. The light efficiency could be increased by decentering the sub-fly eyes and changing their shapes. By simulation, the light efficiencies of these two designs are increased by 16.5% and 26.3% respectively. The illuminating light on liquid crystal panel has good uniformity. In the end, two designs are compared with each other.

Key words: applied optics; optical design; fly eye lens; polarizing beam splitter; light efficiency; uniformity

1 引 言

液晶投影机广泛应用于电化教学、办公、商务以及广告娱乐等方面。照明系统是液晶投影机的重要组成部分,它将直接影响到投影仪的光能利用率以及颜色等系统性能。其中关于系统的色彩分析许多文献均有介绍^[1~3],但关于系统光能利用率的提高却鲜

有报道。近年来,随着光源、照明系统和液晶板性能的提高,投影仪的输出光通量从几百流明增加到了几千流明。其中照明系统利用复眼透镜以及偏振转换系统,使光能利用率和图像均匀性有了较大的提高。在此基础上,为了进一步提高系统的光能利用率,出现了各种形状的复眼设计,如多边形或圆形^[4,5]。有些复眼透镜通过上下两部分交错排布来提高光效率^[6]。这些设计虽然在一定程度上提高了光能利用率,但使得复眼的加工制作非常复杂,不利于生产。本文的两种复眼设计方案均采用矩形复眼,加工简

E-mail: zpzju@yahoo.com

收稿日期: 2003-01-24; 收到修改稿日期: 2003-06-05

单,且具有较高的能量利用率。模拟计算表明,到达液晶板的光能利用率分别为 63%和 69%,而传统设计的光效只有 54%左右。

2 设计原理

经典液晶投影照明系统主要由光源、复眼透镜、偏振转换系统和液晶器件组成,系统结构如图 1,采用复眼照明可获得较高的光能利用率和均匀照明。其工作原理是:复眼透镜 I 将从光源发出的光束分成许多子光束聚焦于复眼透镜 II。同时复眼透镜 II 把与之对应的复眼透镜 I 中的子复眼成像在液晶板

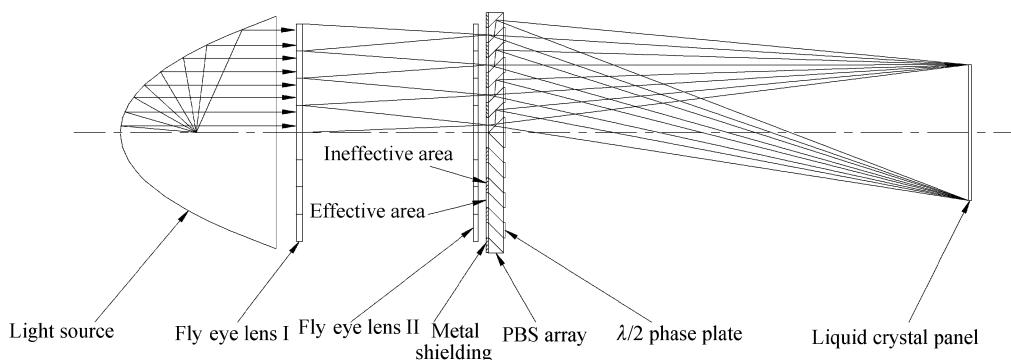


Fig. 1 Illustration of fly eye lens array illumination system

根据复眼透镜的工作原理,复眼透镜的设计必须满足以下条件:

1) 复眼透镜 I 中每个复眼的形状必须与液晶板相同,即长宽比为 4:3^[7]。

2) 液晶投影机中常用的光源弧长为 1~2 mm,复眼透镜 II 上的焦点光斑为灯丝的像,呈椭圆型,其大小与光源参量有关。通常复眼透镜 II 上的光斑大于偏振光分离器通光口径,造成一定的光能损失。因此复眼设计要通过复眼透镜 I 偏心的方法以及复眼透镜 II 改变透镜形状的方法,使得光斑尽可能多地通过金属栅条以及偏振光分离器。

在设计和计算机仿真模拟时,设定光源的总光

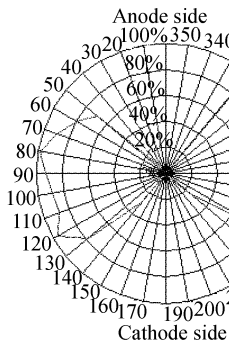


Fig. 2 Light distribution in angular profile

上,不同子光束在液晶板上的相互重叠,从而提供均匀的照明。此外,复眼透镜 I 中的每个矩形子复眼通过复眼透镜 II 及后续光路成像到液晶板上,将光源的圆形光斑转换为液晶板所需要的矩形光斑,从而减少能量损失。由于液晶板照明需要偏振光,所以通过复眼透镜 II 的汇聚光被偏振光分离器分为 P 和 S 两束线偏振光,其中 P 光经过 $\lambda/2$ 波片转化成 S 光。经过偏振光分离器的偏振转换几乎能够完全利用光源的光能。偏振光分离器阵列前是条状金属栅条,遮挡偏振光分离器的非通光区域,其作用是消除杂散光。

通量为 1000 lm,弧长 2 mm,光源的光强分布曲线和辉度分布如图 2、图 3 所示。液晶板的尺寸为 20.32 mm×15.24 mm,采用光线追踪的方法计算光能利用率和照明均匀性。

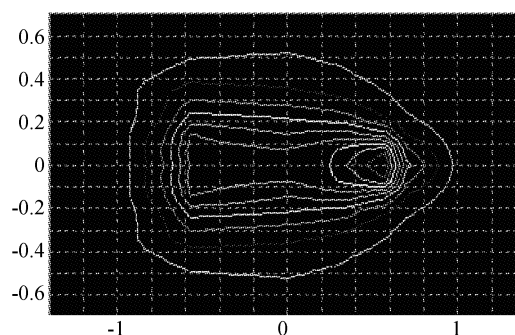


Fig. 3 Light distribution in space profile

3 设计过程

3.1 传统设计

首先,根据灯碗大小和照明系统的孔径角确定复眼透镜的口径和焦距,再根据复眼透镜中小复眼的相对孔径以及照明均匀性要求确定复眼的大小、数目和排列。传统设计中,两块复眼透镜大小形状完全相同,均为 10 行 8 列,焦距相等,复眼透镜 II 放

在复眼透镜 I 的焦平面上。两块复眼均无偏心，即每个复眼的几何中心均与光学中心重合。通过计算机软件模拟表明，光源发出的 1000 lm 的光经过光学系统投射在复眼透镜 II 上剩余 746.91 lm，再经过偏振光分离器后只剩下 587.65 lm，最终到达液晶板上的能量为 544.79 lm。图 4 为复眼透镜 II 上和通过偏振光分离器后的光斑分布比较图，为方便比较，该图左半部分为复眼透镜 II 上的光斑分布，右半部分为通过偏振光分离器后的光斑分布。可见，经过金属栅条后，光能损失严重，说明复眼透镜 II 上的光斑比金属栅条的通光口径大。采用美国国家标准局

(ANSI)标准九点法分析评价照明光斑的均匀性，将液晶板平均分成 3×3 份，模拟计算每部分中心的照度值，九个采样点数据如表 1 所示，括号中数值为该点与中心点照度的比值之差。结果显示，传统设计液晶板上的光分布均匀性最大偏差为 -9.7%。复眼照明的均匀性主要取决于子复眼的个数、排布、大小以及焦距，我们在下面提出的两种提高能量利用率的复眼设计均未改变子复眼的个数、排布、大小和焦距，改变的只有子复眼的光学中心，所以均匀性不会有太大变化。

Table 1 Nine-point illuminance data on liquid crystal panel in traditional design (lux)

11.4×10^5 (+7.5%)	11.2×10^5 (+5.7%)	10.2×10^5 (-3.8%)
9.7×10^5 (-9.2%)	10.6×10^5 (0.0%)	10.7×10^5 (+0.9%)
10.6×10^5 (0.0%)	11.1×10^5 (+4.7%)	10.4×10^5 (-1.9%)

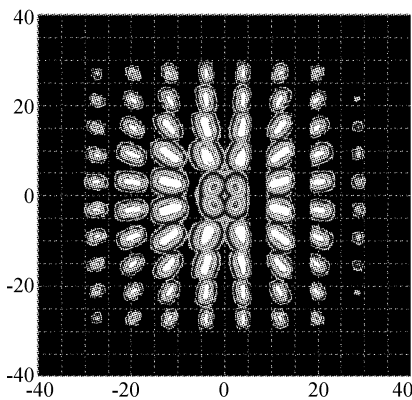


Fig. 4 Light spots on fly-eye lens II (left part) and those after PBS in the initial design (right part)

3.2 方案一：通过复眼偏心提高能量利用率

复眼透镜 II 上的光斑大小和光源的弧长有关，无法通过光学系统设计而改变。因此，我们改变复眼透镜 I 中每块复眼的光学中心，使复眼透镜 II 上的光斑位置平移，从而使光能量最集中的部分通过偏振光分离器的有效通光口径。复眼透镜 II 中每个复眼的形状由其上面的光斑形状所决定。经过优化，最终到达液晶板上的能量为 634.86 lm，能量利用率较传统设计提高 16.5%。复眼透镜 II 上和经过偏振光分离器后的光斑分布见图 5。两个复眼透镜的平面图见图 6，由于复眼透镜的结构是轴对称的，该图仅显示左上角的 1/4 复眼透镜。通过模拟计算，液晶板上九个采样点数据如表 2，括号中数值为该点与中心点照度的比值之差，结果显示，液晶板上的光分布均匀性最大偏差为 +8.4%。由此可见，与传统设计相比，复眼的偏心对照明区域的均匀性

不会有太大影响。

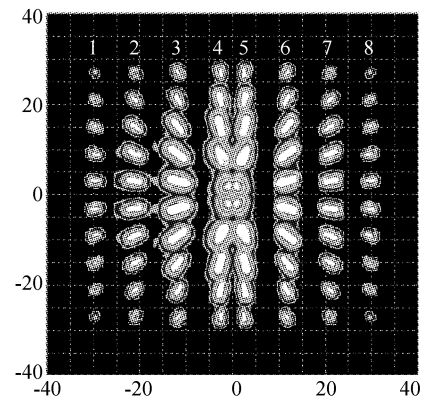


Fig. 5 Light spots on fly-eye lens II (left part) and those after PBS (right part) in Design 1

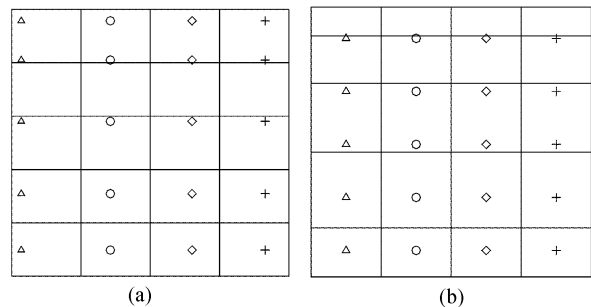


Fig. 6 (a) One quarter structure of fly eye lens array I in Design 1; (b) One quarter structure of fly eye lens array II in Design 1. Δ: Optical centers of the first column fly eye lens; ○: Optical centers of the second column fly eye lens; ◇: Optical centers of the third column fly eye lens; +: Optical centers of the fourth column fly eye lens

Table 2 Nine-point illuminance data on liquid crystal panel in design 1 (lux)

12.2×10^5 (+2.5%)	12.2×10^5 (+2.5%)	12.1×10^5 (+1.7%)
12.6×10^5 (+5.9%)	11.9×10^5 (0.0%)	12.9×10^5 (+8.4%)
12.4×10^5 (+4.2%)	11.9×10^5 (0.0%)	12.6×10^5 (+5.9%)

3.3 方案二：展宽偏振光分离器以提高能量利用率

方案一的设计没有改变传统设计中偏振光分离器的尺寸,仅仅是将复眼透镜 I 的每个复眼进行偏心,复眼透镜 II 的复眼形状进行调整。本方案则同时改变了偏振光分离器和复眼透镜的尺寸。由于复眼透镜 II 上的光斑大于偏振光分离器的有效通光口径,为了使尽可能多的光线通过光学系统,我们将偏振光分离器进行展宽。同时,为保证整个系统的宽度不变,将偏振光分离器阵列由 8 列减少为 6 列,这就要求复眼透镜 II 上的光斑也由 8 列减少到 6 列。由图 5 可看出,第 1、2、7、8 列的光斑小,中间四列的光斑大,所以可以将 1、2 列和 7、8 列交错合并成两

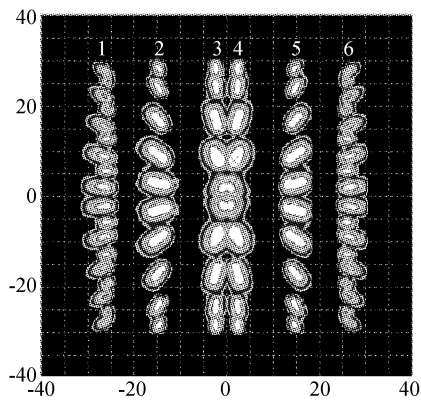


Fig. 7 Light spots on fly-eye lens II (left part) and those after PBS (right part) in Design 2

Table 3 Nine-point illuminance data on liquid crystal panel in Design 2 (lux)

13.2×10^5 (-2.2%)	13.6×10^5 (+0.7%)	12.8×10^5 (-5.2%)
13.4×10^5 (-0.7%)	13.5×10^5 (0.0%)	13.7×10^5 (-1.5%)
13.0×10^5 (-3.7%)	14.0×10^5 (+3.7%)	13.0×10^5 (-3.7%)

4 结果分析

以上两种设计方案的结果较传统设计均有较大的改善,能量利用率显著提高,并且结构简单、加工方便。两个方案相比,方案二的能量利用率更高,但方案二也有其缺点。首先,由于复眼的偏心设计会导致相邻复眼间存在断差^[9],方案二中的复眼偏心比方案一严重,所以相邻复眼间的断差也更明显,加工难度较大;其次,断差的存在一定程度上会降低能量利用率,方案二由于断差造成的能量损失比方案

列^[8]。和方案一原理相同,通过对复眼透镜 I 中的复眼进行偏心,实现复眼透镜 II 上光斑位置的偏移,光斑也由 8 列减少为 6 列,复眼透镜 II 中复眼的几何形状也根据相应光斑的形状进行改变。复眼透镜 II 上和经过偏振光分离器后的光斑分布见图 7。

这时到达液晶板上的光能为 687.87 lm,光能利用率较传统设计提高了 26.3%。两块复眼透镜的平面结构图如图 8 所示。经过模拟计算,液晶板九点采样点数据见表 3,最大均匀性偏差 -5.2%,可见方案二仍然有较好的光分布均匀性。

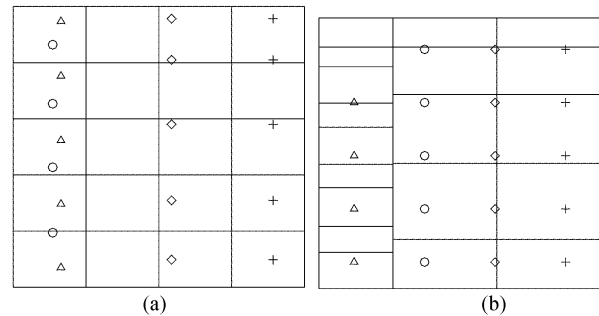


Fig. 8 (a) One quarter structure of fly eye lens array I in Design 2; (b) One quarter structure of fly eye lens array II in Design 2. Δ : Optical centers of the first column fly eye lens; \circ : Optical centers of the second column fly eye lens; \diamond : Optical centers of the third column fly eye lens; $+$: Optical centers of the fourth column fly eye lens

一要大;另外,液晶投影显示系统要求照明系统能够提供相对小孔径的远心照明系统,而复眼的偏心会增大相对孔径,从而降低整个系统的对比度,显示图像的色彩和色饱和度也会下降。方案二能量利用率的提高是以降低系统显示性能为代价的。所以,当显示性能更重要时,采用方案一较好;若输出光通量更重要时,则采用方案二更好。

结论 提高整个系统能量利用率的途径很多,比如缩短光源灯丝弧长,提高液晶板开口率等。本文介绍的两种方法是通过对复眼透镜中子复眼进行偏心

来提高系统的能量利用率。模拟计算表明,二种方法都具有较高的光能利用率和光分布均匀性,并且这两种方法在加工制作上也较易实现。

参 考 文 献

- 1 Gu Peifu, Liu Xu, Li Haifeng *et al.*. Polarization selective beamsplitter used for liquid crystal light valve large screen display. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1995, **15**(8): 1111~1114 (in Chinese)
- 2 Zhang Yueguang, Gu Peifu, Liu Xu *et al.*. Color-separation multilayer systems used for thin film transistor-liquid crystal display. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(6):791~794 (in Chinese)
- 3 Yao Liying, Yi Kui, Yang Jian *et al.*. Design and fabrication of polarizing beam splitter for projection display system. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(9): 1116~1118 (in Chinese)
- 4 Takashi Kakuda. Projection Type Liquid Crystal Display Device, 2002, U. S. Patent Number 6,351,295
- 5 Takashi Kakuda, Yokohama. Projection Type Liquid Crystal Display Device, 2002, U. S. Patent Number 6,416,182
- 6 Chikara Yamamoto. Illuminating Optical System Having Multiple Light Sources and Lenticular Arrays for Use with a Projection-Type Display Unit, 2002, U. S. Patent Number 6,402,325
- 7 Zhang Zengbao, Weng Zhicheng, Cong Xiaojie *et al.*. Design on a fly lens array illumination system applied in LC rear projective TV. *Optics and Precision Engineering* (光学精密工程), 2002, **10**(2): 126~129 (in Chinese)
- 8 Hisashi Iechika, Shiojiri, Illuminating Optical System and Projector, 2001, U. S. Patent Number 6,273,569
- 9 Stupp E H, Brennesholtz M S. Projection displays. *Society for Information Display*, 1998. 116~120