

液晶投影显示复眼照明的容差模拟分析*

郑臻荣

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要 介绍了液晶投影显示复眼照明的工作原理, 采用扩展 4×4 矩阵模型描述了复眼照明, 以能量利用率和照明均匀性作为系统的评价标准, 对复眼透镜的制造误差和位置误差进行计算机模拟分析, 分析表明, 双排复眼透镜相对位置误差对系统性能影响大于加工误差, 而第一排复眼透镜的加工误差对能量利用率的影响大于第二排复眼透镜, 第二排复眼透镜的加工误差对照明均匀性的影响大于第一排复眼透镜.

关键词 复眼照明系统; 扩展 4×4 矩阵; 容差分析

中图分类号 O439, TN946 **文献标识码** A

0 引言

复眼透镜又称为透镜阵列、积分透镜, 由一系列小透镜组合形成, 采用双排复眼透镜照明可以获得高的光能利用率和大面积充分的照明, 1991 年, Shikama 论述了采用双排复眼透镜和偏振转换棱镜作为液晶投影显示系统中光斑形状的转变和偏振光的获得^[1], 从此双排复眼透镜在各种透射式、反射式液晶光阀投影显示中具有很好的应用^[2-4], 2000 年之后, Toshiaki 等人又提出了一系列偏心及变形设计的双排透镜阵列方法^[5-7], 能够进一步提高透镜阵列照明系统的性能. 但目前对双排复眼透镜照明系统的分析大多还是基于传统的几何光学方法, 从复眼透镜的焦距、个数、排列的角度对系统性能进行分析, 并不能很好地描述复眼透镜照明系统的特性. 本文采用增广 4×4 矩阵模型对复眼照明系统进行描述, 并基于矩阵模型建立系统光线追迹模拟, 针对照明系统特征采用光能利用率和照明均匀性作为评价标准, 对双排复眼透镜系统的制造误差和相互位置误差进行容差模拟分析.

1 扩展 4×4 矩阵模型

双排复眼透镜照明系统工作原理如图 1 所示, 光源照射于第一排复眼透镜上, 第一排复眼将光源形成多个光源像进行照明, 第二排复眼透镜的每个小透镜将第一排复眼透镜对应的小透镜重叠成像于照明面上, 由于第一排复眼透镜将光源的整个宽光束被分为多个细光束照明, 且每个细光束范围内的微小不均匀性由于处于对称位置细光束的相互叠

加, 使细光束的微小不均匀性获得补偿^[8-10], 因此采用双排复眼透镜可使整个孔径内的光能量得到有效均匀的利用.

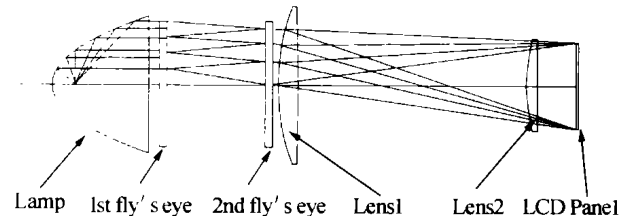


图 1 双排复眼透镜照明系统工作原理

Fig. 1 Illustration of fly's eye illumination system

众所周知, 对于共轴光学系统可以采用 2×2 变

换矩阵方法分析, 可以将光线传播表示成 $\begin{bmatrix} h' \\ \sin u' \end{bmatrix} =$

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ \sin u \end{bmatrix} \text{ 即 } r' = Mr, \text{ 其中 } r = \begin{bmatrix} h \\ \sin u \end{bmatrix} M =$$

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} r' = \begin{bmatrix} h' \\ \sin u' \end{bmatrix}$$

M 光学系统的变换矩阵. 对于整个光学系统而言, 到达最后目标面的光学变换矩阵运用矩阵连乘积描述为

$$\begin{bmatrix} h' \\ \sin u' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ \sin u \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^n M_i \begin{bmatrix} h \\ \sin u \end{bmatrix} \quad (1)$$

由于复眼透镜的每个小透镜相对于整个光学系统而言是非共轴的, 显然, 这种非共轴对光线和光束的传输采用 2×2 变换矩阵无法正确反映光学系统的变换特性, 考虑二维向前非共轴光学系统, 采用两次坐标变换^[11], 即

$$\begin{aligned} & \begin{matrix} \text{调整变换成} \\ \text{共轴系统} \end{matrix} \\ (h_1, u_1) & \xrightarrow{\hspace{1.5cm}} (h_{1m}, u_{1m}) \\ & \xrightarrow{\text{共轴传输}} (h_{2m}, u_{2m}) \\ & \begin{matrix} \text{调整变换成} \\ \text{非共轴系统} \end{matrix} \\ (h_{2m}, u_{2m}) & \xrightarrow{\hspace{1.5cm}} (h_2, u_2) \end{aligned}$$

按照上述思路, 得以下方程组

* 国防预研项目 (6.6.5.1) 支持
Tel: 0571-87951758 Email: zrz@zju.edu.cn
收稿日期: 2003-06-13

$$\begin{cases} h_{1m} = (h - \varepsilon) \\ u_{1m} = (u_1 - \varepsilon') \end{cases} \quad \begin{pmatrix} h_{2m} \\ \sin u_{2m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \cdot$$

$$\begin{pmatrix} h_{1m} \\ \sin u_{1m} \end{pmatrix} \begin{cases} h_2' = (h_{2m} + \varepsilon + l\varepsilon') \\ u_2' = (u_{2m} + \varepsilon') \end{cases}$$

式中 $\varepsilon, \varepsilon'$ 为小透镜的位移偏差和角度偏差的参量, 联立方程, 写为矩阵形式

$$\begin{pmatrix} h_2' \\ u_2' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ u_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon \\ \varepsilon' \end{pmatrix} \quad \text{其中}$$

$$\begin{cases} \alpha = 1 - a, \beta = l - b \\ \gamma = -c, \delta = 1 - d \end{cases}$$

扩展为 4×4 矩阵

$$\begin{pmatrix} h' \\ u' \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b & \alpha\varepsilon & \beta\varepsilon' \\ c & d & \gamma\varepsilon & \delta\varepsilon' \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h \\ u \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

整体复眼透镜系统的光线变换矩阵可写为矩阵连乘形式

$$M = \prod_{i=1}^n M_i = \begin{pmatrix} A & B & E & F \\ C & D & G & H \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

采用扩展 4×4 矩阵能对复眼透镜系统进行较好的描述, 此外, 扩展 4×4 矩阵可以引入包含有位移及角度参数 ε 及 ε' , 如小透镜制造误差引起的位移与角度变化, 能对复眼透镜进行容差分析.

对照明系统我们采用光能利用率和照明均匀性作为评价标准, 由上述光线变换矩阵和程函可对系统性能进行评价, 程函^[12,13]的表达式为

$$L = L_0 + uh + \varepsilon h' + \frac{1}{2}Uh_1^2 - vhh' + \frac{1}{2}Wh^2 \quad (4)$$

式中, L 为程函, L_0 为光学系统在光轴上的光程 u, v, w, U, W 可由光学变换矩阵得

$$\begin{aligned} u &= (E + F)/B \\ \omega &= (BG - DE + BH - DF)/B \\ U &= A/B \\ v &= 1/B \\ W &= D/B \end{aligned} \quad (5)$$

通过衍射积分和程函计算出照明面上某点场分布^[14]

$$I(x, y) = -\frac{ik}{2\pi\lambda} \iint I_1(x_1, y_1) e^{ikL} dx_1 dy_1 \quad (6)$$

式中, I_1 为光源发光面的场强度分布, 因此, 双排复眼系统照明面总强度分布有

$$I_{\text{照明面}} = \iint I(x, y) dx dy \quad \text{因而, 能量利用率为: } \eta = I_{\text{照明面}}/I_{\text{光源}}, \text{ 均匀性为: } \gamma = I_{\text{边缘}}/I_{\text{中心}}$$

2 容差模拟分析

基于 4×4 扩展矩阵模型, 建立双排复眼透镜系统光线追迹软件, 模拟照明面直观的光强分布情况, 图 2 为模拟设计的复眼照明系统无误差情况下在液晶板照明面的光强分布, 其中纵坐标强度分布作了归一化处理, 模拟的系统照明面采用 1 英寸液晶板, 系统结构如表 1.

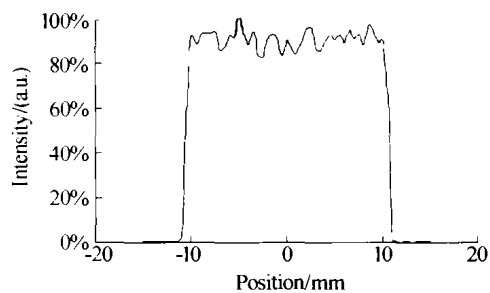


图 2 无误差条件下照明面光强分布
Fig. 2 Simulation intensity distribution of LCD without error

表 1 模拟的双排复眼照明系统光学结构

光学元件	曲率半径 /mm	距离 /mm	玻璃	排列 (行 × 列)
光源	—	10	—	—
复眼 1	∞ -27.2	3 57.5	—	8 行 × 10 列
复眼 2	27.2 ∞	2.5 3	BK7	8 行 × 10 列
透镜 1	119.26 +969.3	12 143	F2	—
透镜 2	80.73 ∞	4.5 10	BK7	—
液晶板	∞	—	—	—

复眼透镜的误差主要有: 一种是复眼小透镜本身制造带来的误差, 如小透镜面形误差、中心偏差等; 另一种误差是相对位置误差, 如复眼与其他元件之间的位置误差、复眼相对于主光面的平移、偏转等, 复眼透镜的制造误差主要是面形误差和中心偏差, 分别模拟第一排复眼透镜和第二排复眼透镜的面形误差和中心偏差, 图 3(a) 为第一排复眼透镜曲率半径误差在 $\pm 5\%$ 内的情况下对照明面的影响, 图 3(b) 为第二排复眼透镜曲率半径误差在 $\pm 5\%$ 内的情况下对照明面的影响, 图 3(c) 为第一排复眼透镜中心偏差在 ± 0.05 mm 内的情况下对照明面的影响, 图 3(d) 为第二排复眼透镜中心偏差在 ± 0.05 mm 内的情况下对照明面的影响, 表 2(a)、(b) 列出对应的各种误差对照明面光能利用率和照明均匀性的影响数值, 模拟表明第一排复眼透镜的面形误差和中心偏差对照明系统能量利用率的影响大于第二排复眼透镜, 而第二排复眼透镜的上述误差对照明均匀性的影响大于第一排复眼透镜.

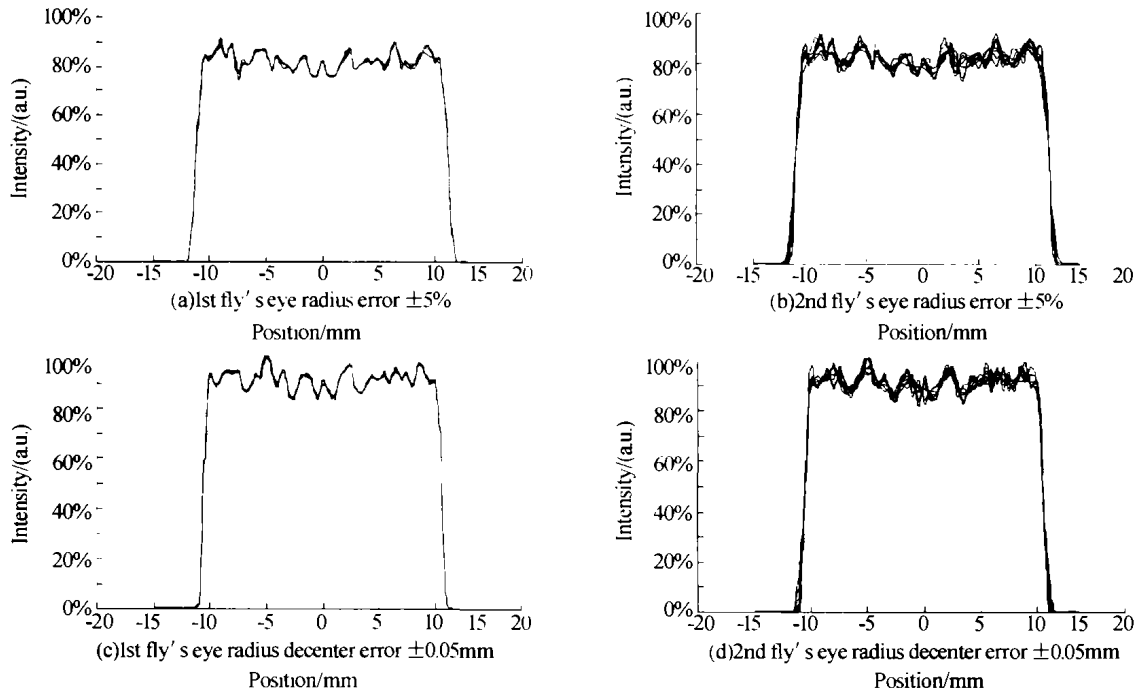


图3 模拟双排复眼透镜制造误差对照明面光强分布的影响

Fig. 3 Simulation intensity distribution under difference deviation of fly's eye lens manufacture

表2 模拟双排复眼照明系统制造误差对光能利用率和均匀性的影响

	(a) 对光能利用率的影响							(b) 对均匀性的影响						
	-5%	-3%	-1%	0%	1%	3%	5%	-5%	-3%	-1%	0%	1%	3%	5%
复眼1 曲率半径误差影响	33.54	33.86	34.06	34.11	34.14	34.13	34.02	83.55	84.11	84.27	84.25	83.09	83.75	83.77
复眼2 曲率半径误差影响	34.20	34.16	34.13	34.11	34.09	34.06	34.03	81.74	81.98	82.99	84.25	83.38	81.06	80.33
复眼1 中心偏差影响	33.91	34.02	34.08	34.10	34.09	34.07	34.01	87.54	86.38	87.50	84.25	83.95	83.88	85.86
复眼2 中心偏差影响	34.07	34.08	34.08	34.10	34.08	34.09	34.10	84.43	84.32	84.22	84.25	84.11	83.69	83.24

复眼透镜系统的相对位置误差主要有复眼透镜的横向位置平移、轴向倾斜和轴向平移,分别模拟第一排复眼透镜和第二排复眼透镜的上述误差影响,图4(a)、图4(b)为第一排、第二排复眼透镜横向位

置平移 ± 0.1 mm 对照明面的影响,图4(c)、图4(d)分别为第一排复眼透镜和第二排复眼透镜轴向倾斜对照明面的影响,图4(e)为复眼透镜轴向位移 ± 0.1 mm 对照明面的影响,表3 分别列出双排复眼

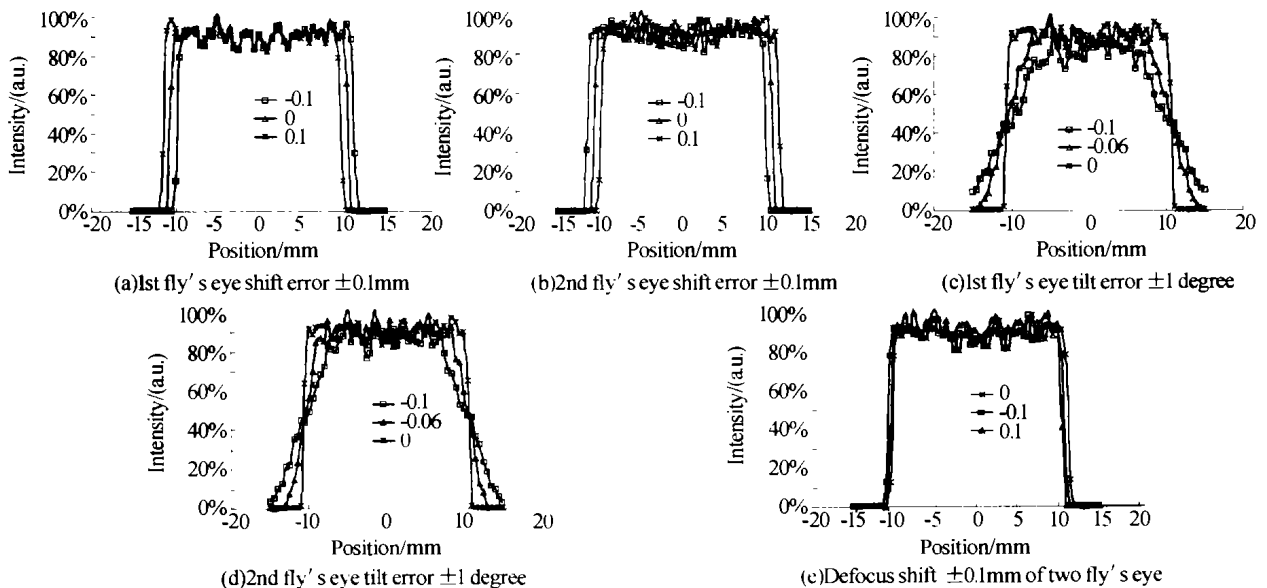


图4 模拟双排复眼透镜相对位置误差对照明面光强分布的影响

Fig. 4 Simulation intensity distribution under difference deviation of fly's eye lens position

表3 表3 模拟双排复眼照明系统位置误差对光能利用率和均匀性的影响
(a) 对光能利用率的影响

	-0.1%	-0.06%	-0.02%	0%	0.02%	0.06%	0.1%
复眼1 横向位置平移影响	32.45	33.68	34.04	34.10	34.07	33.70	32.96
复眼2 轴向位置倾斜影响	27.40	32.43	33.95	34.10	33.94	32.45	27.36
复眼2 横向位置平移影响	33.71	33.95	34.09	34.10	34.09	33.98	33.74
复眼2 轴向位置倾斜影响	26.91	32.14	33.85	34.10	33.84	32.16	26.87
复眼1、复眼2 轴向位移影响	35.06	34.69	34.30	34.10	33.89	33.47	33.04

(b) 对均匀性的影响

	-0.1%	-0.06%	-0.02%	0%	0.02%	0.06%	0.1%
复眼1 横向位置平移影响	15.67	65.11	82.17	82.10	82.25	62.06	15.29
复眼2 轴向位置倾斜影响	47.43	57.23	66.16	82.10	71.26	52.96	55.45
复眼2 横向位置平移影响	16.42	68.32	84.12	82.10	81.49	65.24	16.03
复眼2 轴向位置倾斜影响	42.26	57.23	66.16	82.10	71.26	52.96	46.13
复眼1、复眼2 轴向位移影响	82.93	84.70	82.42	82.10	82.06	83.88	86.27

透镜不同的位置误差对照明光能效率和均匀性的影响数值。模拟表明位移偏差引起的误差主要为照明光斑的偏移,同时,模拟显示轴向倾斜误差 $\pm 10^\circ$ 对系统能量利用率和照明均匀性影响较大,轴向双排复眼平移误差会影响系统能量利用率。

由以上对复眼照明系统模拟表明:复眼透镜的相对位置误差对系统性能影响要显著于加工误差,其中轴向倾斜和横向平移对系统能量利用率和照明均匀性都有显著的影响,轴向平移主要影响系统的能量利用率,而在制造误差中,就能量利用率而言,第二排复眼透镜的容差要小于第一排复眼透镜。

3 结论

本文讨论了液晶投影显示复眼透镜照明系统的 4×4 扩展矩阵模型,并利用自建的程序,分析了复眼透镜的制造误差和位置误差对系统性能的影响,分析表明:液晶投影显示双排复眼照明系统中,双排复眼透镜相对位置误差对系统性能影响较大,其敏感程度要高于复眼透镜加工误差,而其中第一排复眼透镜的加工误差对能量利用率的影响要大于第二排复眼透镜,而第二排复眼透镜的加工误差对照明均匀性的影响要大于第一排复眼透镜,因此,在系统设计、加工过程中必须对复眼透镜的相对位置精度和分别对第一排和第二排复眼透镜的精度加以重点控制,才能得到高的系统性能。

参考文献

- Shikama S, Toide E, Knodo M. A Polarization-transforming optics for a high-luminance LCD projection. *Proceeding of the S I D*, 1991, **32**(4):301~304
- Jacobson B A, Gerglbach R D, Ferri J M. Beam shape transforming device in high-efficiency projection System. *Proc of SPIE*, 1997, **3139**:141~150
- Bowron J, Baker J, Schmidt T. New high-brightness compact

LCD projector. *SPIE*, 1996, **2650**:217~224

- Li H F, Zheng Z R, et al. Improved projection optics for reflective silicon CMOS light valves. *SPIE*, 1999, **3624**:18~22
- Toshiaki H, Tomiyoshi U, Hisashi I. Polarizing illumination device and projection display device. U S Patent 6,092,901, 2000
- Ryusaku T, Tafuru K. Image projector and illumination device used for the image projector. U S Patent 6,046,856, 2000
- Atsushi S, Hideaki S. Polarization device and projection type display apparatus. U S Patent 6,067,193, 2000
- 浙江大学光学教研组. 特殊光学系统. 杭州:浙江大学出版社, 1984. 51~58
- Optical Teaching Research Group. Zhejiang University. Special Optical System. Hangzhou: Press of Zhejiang University, 1984. 51~58
- Deng Ximing, Xiang ChunLiang, Shen Ze Zun. Uniform illumination of large targets using a lens array. *Applied Optics*, 1986, **25**(3):337~381
- Glaser I. Applications of the lenslet array processor. *SPIE*, 1983, **564**:180~185
- 王绍民, 赵道木. 矩阵光学原理. 杭州:杭州大学出版社, 1994. 52~57
- Wang S M, Zhao D M. The Principle of Matrix Optics. Hangzhou: Publication of Hangzhou University, 1994. 52~57
- Wang S M. Matrix method in treating decent optical systems. *Opt & Quantum Electron*, 1985, **117**(1):136~138
- 王子余. 几何光学与光学设计. 杭州:浙江大学出版社, 1989. 6~8
- Wang Z Y. Geometry Optics and Optical Design. Hangzhou: Press of Zhejiang University, 1989. 6~8
- 波恩 M, 沃尔夫 E. 光学原理. 北京:科学出版社, 1978. 176~179
- Bonn M, Wolf E. The Principle of Optics. Beijing: Science Press, 1978. 176~179

Tolerance Analysis for Fly's eye Illumination System of LCLV Projector

Zheng Zhenrong

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Received date: 2003-06-13

Abstract Fly's eye illumination system provided high optical efficiency and super uniformity for large area illumination, especially for LCLV Projector. In this paper, 4×4 extended matrix model was introduced for system, and optical efficiency and uniformity of illumination system were analyzed by extended matrix and optical eikon. Simulation software was constructed under extended matrix model, and different tolerance of manufacture error and position error of fly's eye illumination system was analyzed. By simulation, position error of fly's eye has stronger influence in system performance than that of manufacture error, and the manufacture error of the first fly's eye has stronger influence in the optical efficiency of the system, the manufacture of the second fly's eye has stronger influence in the uniformity of illumination system.

Keywords Fly's eye illumination; Extended matrix model; Tolerance analysis



Zheng Zhenrong was born in Aug. 1972. He received his Ph. D. degree in Department of Optical Engineering in Zhejiang University in 1999, now is working at State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation in Zhejiang University. his research interests are optical engineering and display.