

# 基于 étendue 量的液晶投影物镜相对照度分析\*

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** 基于非成像光学的 étendue 量对液晶投影显示照明系统和投影物镜进行匹配, 对液晶投影物镜的相对照度进行分析, 根据 étendue 量计算照明系统液晶板照明面的发光强度分布, 与根据朗伯体服从余弦分布的计算相对照度的算法进行比较, 并对相对照度的 Rimmer 算法进行修正, 分析和实验表明, 修正算法得到的投影物镜相对照度计算更符合实际情况, 对于投影物镜确定渐晕系数、校正像差有利。

**关键词** 投影物镜; 相对照度; étendue 量

**中图分类号** TH74 **文献标识码** A

## 0 引言

液晶投影显示系统中图像的照明均匀性是一个重要的评价指标。在液晶投影系统设计中, 照明系统和投影物镜通常是相互独立进行设计, 由照明系统提供光斑转换和均匀照明, 由投影物镜将液晶板上的图像清晰投射到屏幕上<sup>[1,2]</sup>。目前液晶投影变焦物镜设计的发展趋势是短焦距、大相对孔径、远心的反远距物镜, 而且焦距的要求还在不断缩短以提供短距离投影, 相对孔径不断增大以提供高的光通量输出, 同时液晶板分辨率也在不断提高, 要求投影物镜提高成像质量<sup>[3,4]</sup>, 因而目前液晶投影变焦物镜的设计经常采用渐晕来减小整体尺寸, 同时减小像差, 提高成像质量, 但采用渐晕设计必然会造成相对照度的下降。

相对照度是光学系统设计中衡量像面照度的一个重要参量, 被定义为像面单位面积的照度与像面最大照度的比值, 是一个与光学系统的相对孔径、渐晕、像差等综合相关的参数<sup>[5]</sup>。在 Zemax、OSLO、CodeV 等各种光学设计软件中, 都提供相对照度的计算, 这些软件的相对照度计算是依据 M. Rimmer 的算法获得<sup>[5]</sup>, 但对于液晶投影显示系统而言, M. Rimmer 算法的最大不足是将物面作为朗伯体来进行处理, 而液晶投影显示中照明系统提供的实际照明分布与理论的朗伯体相差甚远, 这就形成了投影物镜设计中相对照度计算与实际照度严重不符, 同时这对于投影物镜设定渐晕系数、校正像差不利, 这就要求对相对照度的计算进行修正。本文从液晶投影显示的照明系统出发, 利用非成像光学的 étendue 量, 确定照明系统光源和照明区域以及投影物镜的匹配关系, 对投影物镜相对照度的计算进行修正, 从而得到与实际情况更接近的相对照度分布, 更有利

于液晶投影物镜进行校正像差设计。

## 1 理论分析

光学扩展量(étendue 量)是非成像光学理论的重要概念<sup>[6,7]</sup>, 可运用程函方程(eikonal)根据同性非导体媒质中的时谐场导出

$$E = \int du = \iiint n^2 dx dy dL dM = \text{étendue}$$

式中,  $n$  为折射率,  $x, y, L, M$  分别是光学系统光线的位置和方向余弦,  $(x, y, L, M)$  构成的四维空间为相空间, 与哈密尔顿相空间类似, 由 étendue 量的定义可导出: 在光学系统无反射、折射、散射等能量损失的情况下, 通过光学系统后的(étendue 量保持不变, 因而, 系统 étendue 量可以作为通过光学系统某一横截面的光通量描述, 光学扩展量通过理想光学系统保持不变其实是系统能量守恒定律作用的结果。

在光源与液晶板之间, 用照明光学系统进行匹配, 光源到液晶板的光学传递过程是一个光的能量传递过程, 实际的照明光学系统可以认为是一个具有固定效率的光学系统, 因而对照明面的光斑能量分布可以通过光源发光碗后的光斑与照明液晶板的 étendue 量匹配进行分析。

对于液晶投影显示系统实际光源的 étendue 量计算, 我们采用简化的光源模型进行近似计算, 假如认为光源发光弧长近似为直径为  $t$ , 长为  $h$  的朗伯发光圆柱体<sup>[8]</sup>(如果近似认为光源发光体的内部亮度分布均匀的话, 光源的发光角度分布与此较为接近), 则光源的 étendue 量可得

$$E_{\text{Source}} = \pi ht \quad (1)$$

加入反光碗后综合进行考虑, 由图 1 可得出射光斑面的光线位置和角度

$$\begin{cases} r(\varphi) = \frac{\sqrt{t^2 + h^2}}{2} \frac{R'(\varphi)}{R(\varphi)} \frac{\sin(\varphi + \arctan(\frac{t}{h}))}{\cos \eta(\varphi)} \\ \sin \eta(\varphi) = \frac{R(\varphi)}{R'(\varphi)} \sin \varphi \end{cases} \quad (2)$$

\*国防预研项目(6.6.5.1)支持

Tel: 0571-87951758 Email: zrz@zju.edu.cn

收稿日期: 2003-11-24

考虑到发光体和反光碗的轴对称性,对出射光斑的 étendue 量有

$$E_{ref} = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} dr(\varphi) d\cos \eta(\varphi) = f[r(h, d, \varphi_1, \varphi_2)] \quad (3)$$

同时,由于发光光源近似为均匀发光的朗伯体,也可得到出射光斑的光能量效率分布,因而,通过式(4)能建立光源出射光斑面 étendue 量与光能量分布的关系.

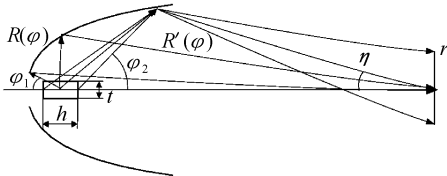


图1 带反光碗光源的 étendue 量分析

Fig.1 étendue analysis for light source with reflector

光源经反光碗出射的光斑经照明系统对照明液晶板面进行匹配,我们将照明系统近似认为是只产生固定光能量损失而不影响 étendue 量的传递<sup>[7]</sup>,则存在

$$I_{LCD} = I_1(E_{ref})\eta_{照明系统} = I_1(E_{LCD})\eta_{照明系统}$$

式中,  $\eta_{照明系统}$  为照明系统的光能效率.

照明系统对液晶板提供远心照明,则液晶板上的允许通过光斑的 étendue 量可计算获得<sup>[9]</sup>

$$E_{LCD} = \int \int n^2 dx dy d\Omega = \int \int \cos \theta dA d\Omega \quad (5)$$

式中 A 为照明区域(液晶板)的单位元面积,  $\Omega$  为照明区域单位面积元的立体角,  $\theta$  为单位面积元法线方向与出射方向的夹角. 联立上述两式,可得液晶板照明面单位发光角度的光能分布曲线.

$$I_{LCD} = I_1(E_{LCD})\eta_{照明系统} = I_1(\int \int \cos \theta dA d\Omega)\eta_{照明系统} = I_2(\theta) \quad (6)$$

各种光学设计软件采用余弦分布计算相对照度的 M. Rimmer 算法导致与实际情况相差太大, M. Rimmer 算法的核心是通过出瞳到像面上每一点参考余弦来计算相对照度,采用  $I_2(\theta)$  作为发光曲线对相对照度计算进行修正可以得到更接近实际的算法,图2为投影物镜相对照度的计算. M. Rimmer 算法对出瞳到像面的方向余弦进行计算,相对照度的计算根据像面边缘的照度与像面中心的照度比值,

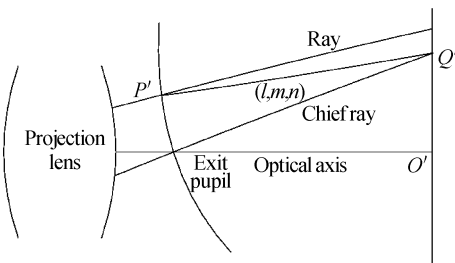


图2 投影物镜相对照度的 M. Rimmer 算法

Fig.2 M. Rimmer algorithm for relative illumination of projection lens

对 M. Rimmer 算法根据发光角度光能分布曲线进行修改得新的相对照度计算公式

$$RI = \frac{(\int_0^{\theta_2} I_2(\theta) d\theta - \int_0^{\theta_1} I_2(\theta) d\theta) \int_0^{\theta_3} I_2(\theta) d\theta}{2(\int_0^{\theta_0} I_2(\theta) d\theta)^2} = \frac{(m_2 - m_1)l}{2m_0^2}$$

式中,  $m_2 = \int_0^{\theta_2} I_2(\theta) d\theta$ ,  $m_1 = \int_0^{\theta_1} I_2(\theta) d\theta$ ,  $m_0 = \int_0^{\theta_0} I_2(\theta) \cdot d\theta$ ,  $l = \int_0^{\theta_3} I_2(\theta) d\theta$

$\theta_2$  为出瞳直径上部到像面中心连线与光轴的角度,  $\theta_1$  为出瞳直径下部到像面中心连线与光轴的角度,  $\theta_3$  为主光线到像面中心连线与光轴的角度,  $\theta_0$  为投影物镜的孔径角,  $I_2(\theta)$  由式(6)根据 étendue 量获得.

经过根据 étendue 量分析得到的照明面的发光角度与强度分布曲线对 M. Rimmer 算法进行修正,可以得到与实际情况更为接近的投影物镜相对照度分析.

## 2 实验分析

图3为我们采用 Zemax 设计的液晶投影变焦物镜,焦距 30 ~ 39 mm,相对孔径  $F^\#1.7 \sim 2.1$ ,图3(b)是 Zemax 软件根据 M. Rimmer 算法计算得到的投影物镜短焦段的相对照度. 建立照明系统装置验证实际的光输出相对照度,采用抛物碗 UHP(Ultra High Press)光源照明,灯丝弧长 1.3 mm,直径 1.2 mm,通过照明系统照明 1 英寸的液晶板,相对孔径为  $F^\#2$ . 图4为根据分析得到的液晶板上的光强-光线角度分布曲线,曲线1为分析得到的液晶板上光强-光线

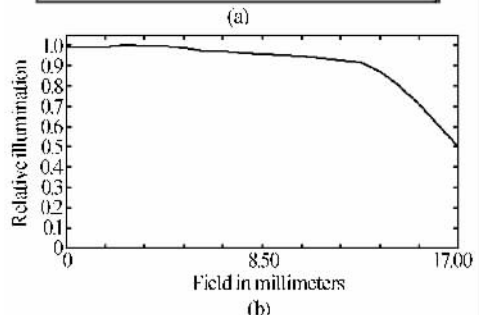
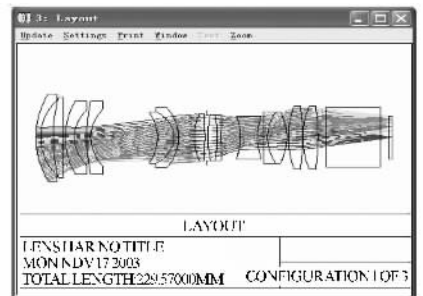


图3 采用 Zemax 软件设计的变焦投影物镜及其相对照度  
Fig.3 The structure of projection lens and relative illumination designed by Zemax

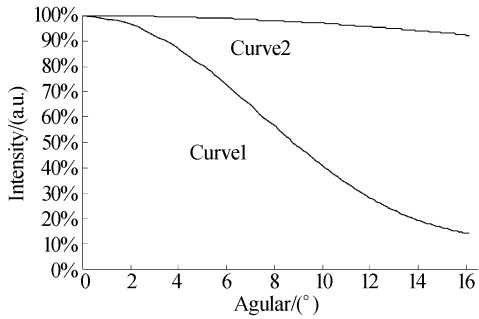


图 4 计算获得的液晶板上光强-光线角度曲线及朗伯体余弦分布比较

Fig. 4 Lambert distribution and intensity distribution calculated by étendue

角度分布曲线, 曲线 2 为服从朗伯体发光的余弦分布, 两者曲线相比较, 有很大的差异, 这也导致各种光学设计软件对液晶投影物镜相对照度计算的不确切性.

实验中将设计并制造完成的液晶投影变焦物镜装入照明系统, 实测投影屏幕上各位置的照度分布. 图 5 为实测相对照度与设计的比较, 曲线 1 为 Zemax 设计曲线, 曲线 2 为采用校正方法得到的曲线, 曲线 3 为实测的相对照度曲线, 由三条曲线比较可知, 采用 M. Rimmer 算法得到的相对照度计算与实际情况差异很大, 尤其在轴外由于投影物镜采用了较大的渐晕设计而对相对照度影响很大的情况下, 采用 M. Rimmer 算法有较大的偏差, 而实际情况由于光源及照明系统的缘故, 在液晶板面形成的发光曲线分布与朗伯体分布有显著的不同, 从而形成投影物镜在轴外的相对照度并不象常规光学设计计算软件所得, 采用 étendue 量对计算修正可以得到一个更为接近实际的结果, 这样可以根据液晶投影系统的照明要求, 确定合理液晶投影显示物镜的渐晕系数, 同时对校正物镜像差和减小口径等设计非常有利.

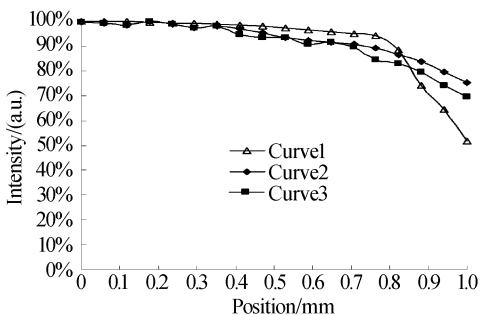


图 5 M. Rimmer 算法与修正算法得到的相对照度与实测比较

Fig. 5 Relative illumination of experience result and calculated by M. Rimmer revised algorithm

### 3 结果与讨论

本文对液晶投影显示物镜的相对照度计算进行

了分析, 采用非成像光学的 étendue 量分析照明面的发光强度分布, 从而对目前各种光学设计软件中的相对照度计算进行修正, 得到更为符合实际情况的相对照度计算, 这对于液晶投影物镜确定合适的渐晕系数、校正像差非常有利.

本文得到的基于 étendue 量方法修正液晶投影物镜相对照度的计算方法, 是一个近似算法, 其基础是基于非成像光学概念的 étendue 量, 在分析过程中并未考虑液晶板对光线透射特性的影响, 即认为液晶板的透射特性是理想的, 认为光线通过液晶板只有透过率的影响, 并不改变光线的出射方向. 在计算过程中存在两步近似, 首先是假设光源是圆柱形的朗伯发光体, 而实际中液晶投影显示所用 UHP (Ultra High Pressure) 光源的发光角度有一点差异, 尤其在采用交流 UHP 灯的时候, 差异性更大, 并且由于光源为气体放电灯, 光源内部各点的发光强度也有一定的差异, 因而计算如果能加入权重可能会更为精确; 其次在计算过程中, 假设光能在传输过程中, étendue 量在照明光学系统各元件中传播不受影响, 实际过程中如果照明系统中存在着 PBS (Polarization Beam Splitter) 等一类分光束光学元件的情况下, 将会对系统的计算存在着一定的偏差, 如果采用如上算法就必须进一步进行修正.

#### 参考文献

- Zheng Zhenrong. Tolerance analysis for fly's eye illumination system of LCLV projector. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33** (4): 593 ~ 597
- Zheng Zhenrong. Color-separating multilayer systems used for FTT-LCD projector. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31** (8): 1016 ~ 1019
- Kreitzer M, Moskovich J. Zoom projection lens. *SPIE*, 1995, **2539**: 64 ~ 74
- Zinter B, Sanson M. Telecentric Zoom Lens. *Zoom Lenses III. Proceedings of SPIE*, 2001, **4487**: 130 ~ 139
- Rimmer M. Relative illumination calculation. *SPIE*, 1986, **665**: 99 ~ 104
- Welford W T, Winston R. Light Collection Nonimaging Optics. *Academic*, New York, 1989, 35 ~ 39
- Winston R. Nonimaging optics. *Sci Am*, 1991, **264**(3): 26 ~ 81
- Matsumoto K K. Short arc metal halide lamp suitable for projector application. *SPIE*, 1995, **2407**: 23 ~ 35
- Brennesholtz M S. Light collection efficiency for light valve projection systems. *SPIE*, 1996, **2650**: 71 ~ 79

# The Analysis of Relative Illumination for Projection Lens Based on étendue

Zheng Zhenrong

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

Received date: 2003-11-24

**Abstract** Based on étendue, relative illumination of projection lens is analyzed. With consideration of the inner intensity distribution and angular distribution of light source, the intensity distribution vs étendue of facular emitted from lamp together with reflector has been deduced. Moreover, the intensity vs angular distribution of facular on LCD panel, which is far different away from Lambert distribution, has also been obtained by étendue transfer. Under the analysis, calculation method for relative illumination is revised, and relative illumination of LCD projection lens is calculated. By experiment, the new method based on étendue has more accuracy in relative illumination calculation for LCD projection lens.

**Keywords** projection lens; Relative illumination; étendue

**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.

