

doi: 10.3788/gzxb20124107.0766

# 一种新颖微型液晶显示器背光设计技术

金诗玮<sup>1</sup>, 杨新军<sup>1,2</sup>

(1 中航华东光电有限公司, 上海 201114)

(2 现代显示技术国家重点实验室; 特种显示国家工程实验室, 上海 201114)

**摘 要:**针对目前机载头盔显示系统中的微型液晶显示器背光模组亮度和均匀性不足问题, 提出了一种新颖的微型液晶显示器背光结构及设计理论, 并通过 CODEV 软件设计了背光光学系统, 利用 LIGHTTOOLS 软件对背光模组进行了配光效果仿真, 结果证明当采用 85 lm 绿色 LUXEON Rebel LEDS 作光源时, 其输出光亮度接近  $160\ 000\ \text{cd}/\text{m}^2$ , 均匀性大于 85%, 功耗仅有 1.25 W, 完全满足了机载头盔显示系统的要求。

**关键词:**液晶显示器; 背光设计; LED 灯; 配光; 头盔显示器

中图分类号: O435

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)07-0766-5

## 0 引言

目前机载头盔显示系统 (Helmet-Mounted Display System, HMDS) 是靠微型 CRT 提供视频图像<sup>[1,2]</sup>。但其存在需要高压, 体积和重量较大, 使 HMDS 的安全性和人机功效不能很好地满足机载要求。现有技术解决的方法是采用平板显示器取代微型 CRT, 微型液晶显示器<sup>[3]</sup> (Liquid Crystal Display, LCD) 以其厚度薄, 质量轻, 像质好且工作稳定, 成为平板显示器中最佳选择。

但机载头盔显示器既要求透视式显示又需要很高的亮度<sup>[4-5]</sup>, 在这种情况下, HMDS 就必需采用亮度很高的图像源, 目前亮度要求不低于  $15\ 000\ \text{cd}/\text{m}^2$ , 依据微型显示屏的透过率约为 10% 的事实, 要满足微型液晶显示器的亮度要求, 背光模组的亮度必须要大于  $150\ 000\ \text{cd}/\text{m}^2$ 。在不考虑整体功耗的情况下, 目前底部背光的设计方法可以得到所要的亮度<sup>[6-7]</sup>。但由于种种原因, 大多数 HMDS 应用中低功耗是十分重要的: 1) 低功耗对便携系统最大程度地延长电池工作时间十分关键; 2) 必须实现头部安装部件的最低功耗, 从而使必要的图像源散热结构不增加头部支持的重量。

本文针对现有技术存在的上述问题, 提出了一种采用锯齿形全内反射镜准直, 自由曲面匀光, 既能实现高亮度、高均匀性照明, 又能实现低功耗的微型液晶显示器 LED 背光模组设计技术。

## 1 背光设计理论

目前用于 LED 照明的光学准直器主要有两种: 1) 采用菲涅尔透镜进行二次配光的准直器<sup>[8-9]</sup>; 2) 利用抛物面形全内反射进行二次配光的准直器<sup>[10]</sup>。但对于微型液晶显示器而言, 采用菲涅尔透镜对 LED 发出的光进行准直作为背光, 会带来比较大的能量损失, 同时由于菲涅尔透镜固有的光学特性 (比如: ①比较大的  $F$  数, ②比较大的负色散系数) 会产生聚焦误差, 造成很大的杂散光; 利用抛物面形全内反射对 LED 发出的光进行准直作为背光, 会使微型液晶显示器的体积和重量比较大。

### 1.1 锯齿形全内反射镜准直器设计理论

为克服上述缺点, 本文提出采用锯齿形全内反射镜 (Total Internal Reflection, TIR) 作为光学准直器, 给出了锯齿形全内反射镜准直器设计技术, 实现了 LED 光源的二次配光。

对于准直器而言, 任何方向的入射光线, 其出射方向均为准直方向, 如图 1、图 2 所示, LED 灯 1 发出的光线 3 垂直入射面  $S_5$  传输进锯齿, 被锯齿的反射面  $S_6$  反射后垂直于出射面  $S_4$  出射; 当使准直器每个锯齿的入射面  $S_5$  都朝向 LED 灯, 且每个锯齿的出射面  $S_4$  彼此平行时, 根据全内反射光学定律和几何关系即可确定锯齿形全内反射镜准直器的锯齿形状和取向。据此, 对锯齿形全内反射镜进行设计, 如图 3 所示, 出射面  $S_4$  通光口径  $D$  为 25.4 mm, 锯齿齿尖包络形成抛物面  $S_3$ , 其焦距  $f$  为 6 mm, 方程为

基金项目: 国家高技术研究发展计划军口项目 (No. 2011AA7044036) 资助

第一作者: 金诗玮 (1973-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为光电显示技术及器件研制. Email: jinsw@caticsz.com.cn

通讯作者: 杨新军 (1969-), 男, 副教授, 主要研究方向为光学设计与光电显示技术. Email: 13956163027@126.com

收稿日期: 2011-11-23; 修回日期: 2012-01-04

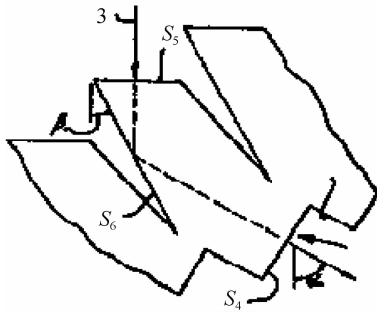


图 1 锯齿形全内反射镜光线追迹  
Fig. 1 Ray trace of toothed TIR lens

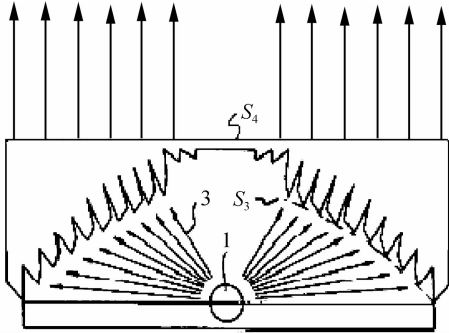


图 2 锯齿形全内反射镜准直器轮廓图  
Fig. 2 Skeleton map of toothed TIR collimator

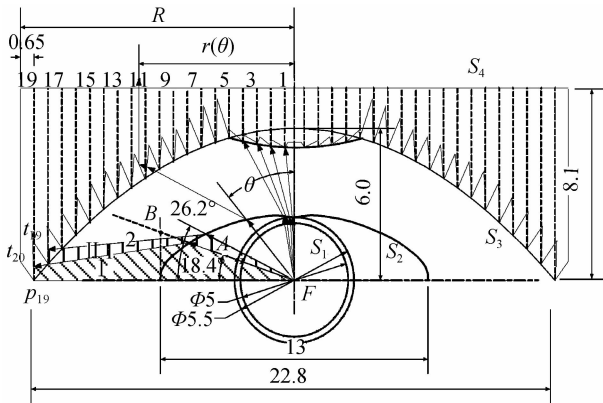


图 3 自由曲面透镜设计原理图  
Fig. 3 Design principle sketch of free surface lens

$$z = \frac{y^2}{4f} + f$$

中心环带宽 0.7 mm, 其余环带等宽, 取环带宽 LW 为 0.65 mm, 从中心向外对环带编号依次为 0、1、2...19, 共 20 个环带, 齿尖编号依次为  $p_1$ 、 $p_2$ ... $p_{19}$ , 齿根编号依次为  $t_1$ 、 $t_2$ ... $t_{20}$ , 满足约束条件: 边缘最大厚度小于 8.1 mm, 齿根夹角大于  $20^\circ$ , 齿根到出光面不小于 0.35 mm. 光线  $FP_{18}$  经  $t_{19}p_{19}$  折射后, 在  $t_{20}p_{19}$  上全反射, 并在 19 环带出射, 以此类推, 经计算当到第 5 环带时, 齿根深度不满足约束, 即从  $p_5$  开始使用透射菲涅耳透镜结构, 考虑适当焦距, 取其基准面 R 为 11.5 mm, 完成锯齿形全内反射镜初始结构.

然而 LED 灯发光符合朗伯体, 光通量集中在发光面法线方向, 偏离法线方向光通量按余弦规律下

降, 偏离  $90^\circ$  时, 光通量下降为零. 因此直接采用锯齿形准直器对 LED 发出的光线进行准直, 在其出射面  $S_4$  上, 光强分布中间强, 越往边缘强度越弱, 无法作为液晶显示器背光使用.

### 1.2 自由曲面散射器设计理论

为了克服锯齿形全内反射镜准直器的不足, 微型液晶显示器背光模组采用自由曲面透镜对来自 LED 光源的光线进行扩散, 自由曲面透镜采用特殊结构的负透镜形式, 能将光线折向偏离发光面法线方向, 理想情况下, 可实现  $0-90^\circ$  光通量均匀分布. 如图 3 所示, 首先根据采用的 PHILIPS LUMILEDS 公司绿色 LUXEON Rebel LED 尺寸, 确定自由曲面散射器表面  $S_1$  为半径 2.5 mm 球面, 以便于 LED 光源安装; 同时为实现锯齿形全内反射镜出射面  $S_4$  光通量分布均匀, 即达到匀光作用. 表面  $S_2$  设计为自由曲面.

锯齿形全内反射镜的出射面  $S_4$  光通量均匀分布, 意味着以半径为  $r$  的圆内出射的光通量 ( $\Phi_r$ ) 与出射面出射的总光通量 ( $\Phi_R$ ) 的比满足以下关系

$$\Phi_r / \Phi_R = (r/R)^2 \tag{1}$$

另一方面, 对应于角  $\theta$  的强度密度  $J(\theta)$  可表示为

$$J(\theta) = \frac{\int_0^\theta I(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi}{\int_0^{\pi/2} I(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi} \tag{2}$$

对于 LED 灯, 其发光特性满足朗伯体, 故角强度分布满足

$$I(\theta) = I_0 \cos(\theta) \tag{3}$$

于是可确定出射面内任一出光圆域半径  $r$ 、出射面最大半径  $R$  及对应出光圆域半径  $r$  的出射角  $\theta$  的关系为

$$r(\theta) = R \cdot \sin(\theta) \tag{4}$$

根据式 (4) 第 19 环带对应的水平夹角为  $18.4^\circ$ , 如图 3 所示, 该夹角内的光线, 即位于 I 区内的光, 经与表面  $S_2$  折射后, 全部通过  $P_{18}P_{19}$  所在段包络抛物物面, 在  $t_{19}p_{19}$  面上折射, 经  $t_{20}p_{19}$  全反射绝大部分从  $S_4$  的 19 区内出射, 考虑配光镜的最小厚度, 选定为 0.25 mm, 环带 19 的边界光线 1 与  $S_2$  的交点, 可在  $AB$  上选取, 并将该点作为一个 B 样条曲线控制点, 依此类推确定其它环带边界光线与  $S_2$  的初始交点, 同时交点处的表面斜率也被唯一确定, 这样建立表面  $S_2$  初始参量, 如表 1.

表面  $S_2$  由旋转对称三次 B 样条曲线构成, 函数表达式为

$$y = Ay_j + By_{j+1} + Cy_j'' + Dy_{j+1}'' \tag{5}$$

式中函数系数为

表 1 表面  $S_2$  初始参量及三次 B 样条函数系数Table 1 Parameter of surface  $S_2$  and coefficient of the third power B-spline

$J$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$X_j$	6.50	6.20	6.00	5.60	5.20	4.80	4.40	4.00	3.60	3.20
$Y_j$	0	0.59	1.14	1.7	2.07	2.35	2.58	2.75	2.89	3
$j$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$X_j$	2.80	2.40	2.0	1.6	1.4	1.3	1.2	1.10	1.00	0.90
$Y_j$	3.08	3.13	3.15	3.15	3.153 1	3.143 7	3.14	3.124 1	3.108 4	3.088 7
$j$	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
$X_j$	0.80	0.70	0.60	0.50	0.40	0.30	0.20	0.10	0.00	
$Y_j$	3.07	3.042 5	3.018 8	2.995 7	2.97	2.954 7	2.939 4	2.929 5	2.93	

$$A \equiv \frac{x_{j+1} - x}{x_{j+1} - x_j}$$

$$B \equiv 1 - A = \frac{x - x_j}{x_{j+1} - x_j}$$

$$C \equiv (A^3 - A)(x_{j+1} - x_j)^2 / 6$$

$$D \equiv (B^3 - B)(x_{j+1} - x_j)^2 / 6.$$

通过表 1 的初始参量可确定式(5)的系数值,由此得到表面  $S_2$  三次 B 样条曲线函数表达式.

## 2 背光光学系统设计

目前满足机载头盔显示系统要求的微型液晶显示器,有美国 KOPIN 公司生产的 0.97 英寸单晶液

晶显示器(美国 F-35 战斗机配备的先进头盔显示系统采用该液晶显示器),它的有效显示面积约为  $19.2 \times 16.7 \text{ mm}^2$ ,分辨率不低于  $1280 \times 1024$ ,显示屏透射率接近 10%. 基于此确定了背光光学系统初始参量,如前所述. 为了实现光学系统结构参量的优化,利用 CODEV 软件的宏语句建立用户自定义特殊的锯齿面  $S_3$ ; 使用 CODEV 中的扩展样条曲面构建自由曲面  $S_2$ . 按照准直系统结构优化要求,进行非序列追迹仿真,优化结果及其系统设计参量如表 2.

系统光线追迹效果如图 4. 从图中可以看出,优化后的自由曲面匀光散射器形状类似蘑菇,这完全吻合 LED 灯的朗伯体发光特性.

表 2 背光光学系统设计参量

Table 2 Parameter of backlight optical system

Surface #	Surface type	Y radius	Thickness	Glass	Refract mode	Y semi aperture
Object	Sphere	Infinity	0.01	Bk7_scho	Refract	
Stop	Sphere	Infinity	1.25	Bk7_scho	Refract	0.008 6
2	Sphere	-1.25	1.24		Refract	1.25
3	Sphere	-2.5	0.25	Bk7_scho	Refract	2.500 1
4	Extended spl	2	2.5		Refract	6.25
5	User defined	-1	2.8	Bk7_scho	Refract	12.5
6	Sphere	Infinity	0		Refract	12.5
7	Sphere	Infinity	3		Refract	12.5
Image	Sphere	Infinity	0		Refract	12

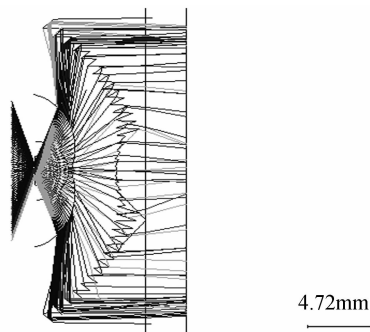


图 4 系统光线追迹效果

Fig. 4 Ray tracing effect of the optical system

## 3 仿真结果及分析

将设计好的新型背光模组通过 LIGHTTOOLS 光电仿真软件进行光学仿真试验,采用 PHILIPS LUMILEDS 公司的绿色 LUXEON Rebel LEDs 做

仿真试验光源,背光模组的光路如图 5.

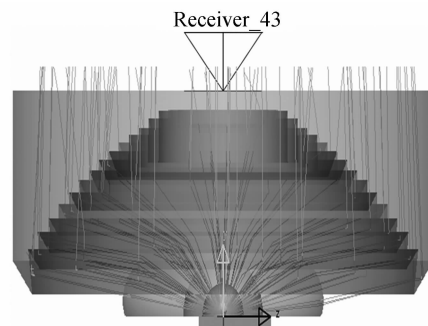


图 5 背光模组的结构及光路图

Fig. 5 Structure and optical path of the backlight module

从图中可以看出,自由曲面匀光散射器将 LED 出射的光线向边缘偏转,同时锯齿形全内反射镜利用锯齿的特殊结构将光线几乎全部准直反射到出射面. 出射面的追迹光线分布如图 6.

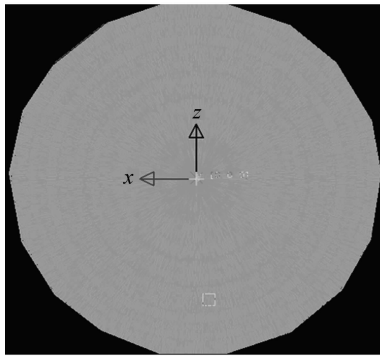


图6 出射面光线分布图

Fig. 6 Distribution diagram of ray on exited surface

从图6可以看出,出射面光线分布非常均匀,完全满足微型液晶显示器对背光照度均匀性要求.另外,仿真时背光模组LED灯输出光通量根据降额要求采用85流明,追迹光线照度仿真结果如图7.

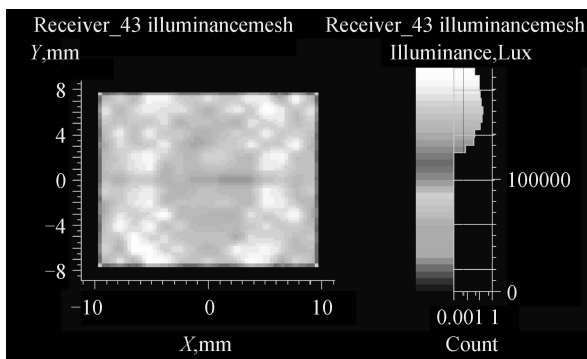


图7 光栅式照度分布

Fig. 7 Raster chart of illumination

从图7可以看出,背光模组平均亮度接近 $180\,000\text{ cd/m}^2$ ,均匀度接近80%.为进一步提高背光模组亮度均匀性,在出射面 $S_4$ 增加了一块漫射膜,使得背光模组照度分布均匀度提高到85%,背光模组平均亮度超过 $160\,000\text{ cd/m}^2$ ,此时背光模组功耗小于1.25 W.完全满足机载头盔显示器对微型液晶显示像源高亮度、低功耗要求.

## 4 结论

本文提出锯齿形全内反射镜准直器加自由曲面形匀光散射镜组成微型液晶显示器背光模组的结构形式,以及锯齿形全内反射镜准直器和自由曲面形匀光散射镜设计理论,并利用该理论确定了锯齿形全内反射镜准直器及自由曲面形匀光散射镜的初始

结构参量.通过CODEV光学设计软件建立了光学模型,编写了锯齿形全内反射镜曲面面型程序,使用软件自带样条函数构建了匀光散射镜自由曲面面型,经过CODEV软件优化确定了最终背光模组结构.通过LIGHTTOOLS光电仿真软件对优化后的背光模组进行仿真试验,采用PHILIPS LUMILEDS公司的绿色LUXEON Rebel LEDS做背光光源,当LED输出光通量85 lm时,背光模组平均亮度接近 $180\,000\text{ cd/m}^2$ ,均匀度接近80%,此时的功耗仅1.25 W.由此构成的微型液晶显示器非常适合作机载头盔显示器护目镜投射显示系统图像源.

## 参考文献

- [1] TOMILIN M G. Head-mounted displays [J]. *Journal of Optical Technology*, 1999, **66**(6): 528-533.
- [2] FRANK J F. An update on optical systems for military head mounted displays [C]. *SPIE*, 1999, **3689**: 178-185.
- [3] OLLIE C W, RONALD P G, HIAP L O, *et al.* Developing the 1280 by 1024 AMLCD for the RAH-66 comanche [C]. *SPIE*, 2000, **4021**: 203-213.
- [4] DEAN F K, TASK H L. Measurement of military helmet- and head-mounted display (HMD) visor optical properties [C]. *SPIE*, 2000, **4021**: 120-132.
- [5] YANG Xin-jun, WU Hua-xia, YU Xiao-fen, *et al.* Distortion correction for optical system of helmet visor display [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(3): 455-459.  
杨新军,吴华夏,余晓芬,等.机载护目镜型头盔显示器畸变校正[J].光子学报,2010,**39**(3):455-459.
- [6] AMES A J. Fundamentals for a low-profile high-brightness LCD backlighting [C]. *SPIE*, 2000, **4021**: 187-194.
- [7] 吴华夏,沈健,董戴,等.渐变间距LED排列构成的直下式背光源:中国,200910117121.3[P].2011-01-05.
- [8] ZHAO Hua-long, LIANG Zhi-yi, SHI Xing-chun, *et al.* The design of LED using in optical projector [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2): 244-246.  
赵华龙,梁志毅,石兴春,等.利用LED的投影系统光源设计[J].光子学报,2007,**36**(2):244-246.
- [9] KUANG Li-juan, ZHAI Jin-hui, 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.
- [10] DING Yi, GU Pei-fu. The freeform reflector for uniform illumination [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 540-544.  
丁毅,顾培夫.实现均匀照明的自由曲面反光器[J].光学学报,2007,**27**(3):540-544.

## A Novel Micro-LCD Backlighting Design Technology

JIN Shi-wei<sup>1</sup>, YANG Xin-jun<sup>1,2</sup>

(1 *China Aviation Huadong photoelectric (Shanghai) Co., Ltd, Shanghai 201114, China*)

(2 *State Key Laboratory of Modern Display; National Engineering Laboratory for Special Display, Shanghai 201114, China*)

**Abstract:** Aiming at the problem that the current micro-LCD brightness can not meet the brightness requirements of airborne helmet-mounted display, a novel backlighting structure form and design principle were proposed, and the optical system was designed using the CODEV software. The light distribution effect of the backlight module was simulated using the LIGHTTOOLS software. The results show that, when taking 85 lm green LUXEON Rebel LEDs as the light source, its output brightness is close to 160 000 cd/m<sup>2</sup>, uniformity is greater than 85%, and power consumption is only 1.25 W, which meets the requirements of the airborne helmet-mounted display.

**Key words:** Liquid Crystal Display(LCD); Backlighting; Light-Emitting Diode(LED); Light distribution; Helmet-mounted display