

doi:10.3788/gzxb20174612.1222002

基于自由曲面的裸眼 3D 显示柱透镜光栅设计

张晓婷¹, 陈芳萍¹, 叶绿青², 王孝艳¹, 蔡智辉¹, 庄其仁¹

(1 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

(2 华侨大学 外国语学院, 福建 泉州 362021)

摘 要:设计了一种用于裸眼 3D 显示屏的低串扰新型双面柱透镜光栅板,光栅板的入射面为等间距排列的与显示器子像素数量相同的凹形自由曲面光栅结构,出射面为斜置的凸形自由曲面光栅结构.根据裸眼 3D 显示原理和几何光学原理推导了双面光栅板的光栅单元自由曲面设计公式和光栅参数计算公式.通过 MATLAB 编程计算和 SolidWorks 软件建模得到光栅板模型.用 TracePro 软件对所设计的光栅板模型进行光线追迹仿真,结果表明:参数优化后的 6 视点斜置柱透镜双面光栅 3D 显示在最佳视角的图像串扰度为 0.068%,与传统 6 视点斜置柱透镜光栅的最佳视角图像串扰度相比降低了 2 个数量级,并且在观看距离 2 000 mm~3 000 mm 范围内图像串扰度基本不变.

关键词:裸眼 3D 显示;柱透镜光栅;光学仿真;串扰;自由曲面;多视点

中图分类号:TN141.9

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)12-1222002-10

Design of Cylindrical Lens Grating Based on Free-form Surface for Naked-eye 3D Display

ZHANG Xiao-ting, CHEN Fang-ping, YE Lv-qing, WANG Xiao-yan, CAI Zhi-hui, ZHUANG Qi-ren

(1 College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Fujian, Xiamen 361021, China)

(2 College of Foreign Languages, Huaqiao University, Fujian, Quanzhou 362021, China)

Abstract: A novel lenticular screen of double-sided grating applied in low-crosstalk naked-eye 3D display is designed. Linear concave free-form gratings, with their number of grating lines equal to the number of horizontal sub-pixel on the screen display panel, are fabricated into the incident surface of the lenticular screen, and convex free-form slanted gratings are fabricated into the opposite surface. Design formulas for grating free-form surface and grating parameters are deduced based on the principles of naked-eye 3D display and geometrical optics. The grating parameters are calculated using MATLAB and grating model is established by modeling software Solidworks. The results show that the image crosstalk in 6-view naked-eye 3D displays, using double-sided lenticular screen, is 0.068% at the best viewing angle by selecting optimal parameters, which is lower than a conventional one by 2 orders of magnitude. The image crosstalk remains basically unchanged within the range of the viewing distance of 2 000 mm~3 000 mm.

Key words: Naked-eye 3D display; Cylindrical lens grating; Optical simulation; Crosstalk; Free-form surface; Multi-view

OCIS Codes: 220.3620; 120.2040; 350.2770; 350.4800

0 引言

平板显示技术的应用,推动了立体(3D)显示技术的研究不断发展^[1].在显示屏前放置柱透镜光栅^[2]的裸

基金项目:福建省科技计划(高校产学研合作)重大项目(No. 2016H6016)和华侨大学研究生科研创新能力培育项目(No. 1400401022)资助

第一作者:张晓婷(1991-),女,硕士研究生,主要研究方向为 3D 显示技术. Email:251674413@qq.com

导师(通讯作者):庄其仁(1960-),男,教授,学士,主要研究方向为照明与显示技术和光电检测技术. Email:qrzhuang@hqu.edu.cn

收稿日期:2017-05-31; **录用日期:**2017-09-25

<http://www.photon.ac.cn>

眼 3D 显示最大的优点是画面亮度不会降低^[3-4].为了平衡视差图像分辨率在水平和垂直方向的损失以及减少彩色莫尔条纹的影响,目前的柱透镜光栅都采用按一定角度倾斜放置的方案^[5],但这导致柱透镜光栅在对合成图像进行分光时,会产生视点之间图像的串扰^[6].串扰影响了裸眼 3D 显示器的图像质量,容易使观看者产生眩晕等不适现象.虽然已有很多方法来减小视差图像之间的串扰,如通过减小左右眼视差图像间的视差来减少图像串扰的影响^[7-8],但这同时将削弱立体感和沉浸感;从偏振透镜阵列、软件编码、液晶显示器(Liquid Crystal Display, LCD)像素刷新以及光学模组^[9-10]等方面提出了一些串扰减弱办法,通过遗传算法来优化改善柱透镜参数以降低串扰^[11];通过纠正合成图像子像素亮度值而使得相邻视点之间的显示图像串扰消除的方法^[12],但这种方法需要大量的数据运算,对于显示静止图片容易实现,而对于不断变化的视频图像其对处理器的运算速度要求极高.

通过设计双层柱透镜光栅结构可以降低裸眼 3D 显示器的图像串扰度,采用圆柱面结构的双层柱透镜光栅不但可以提高光能利用率,还可以使大视角范围内的图像平均串扰度与传统单层柱透镜光栅结构相比略有降低(可从 48.6%降低到 38.3%),但对降低最佳视角的图像串扰度作用不大,其串扰度仍大于 10%^[13].为了能显著降低最佳视角的图像串扰度,本文研究一种新型裸眼 3D 自由曲面双柱透镜光栅面板结构,首先通过凹柱透镜将显示屏矩形子像素的宽度压缩,成为近似线形的子像素虚像,再由凸柱透镜成像在视区位置,实现在最佳视角的图像串扰度接近为 0(即无串扰)的裸眼 3D 显示.该方法不需要复杂的数字图像处理,降低了对处理器运算速度的要求,同时无需减小左右图像视差,因而不会削弱裸眼 3D 显示图像的立体感和沉浸感.

1 原理

用于低串扰裸眼 3D 显示的新型斜置柱透镜光栅结构和工作原理如图 1,入射面为等间距排列的凹形自由曲面(凹柱透镜)光栅结构,该光栅结构竖直放置,且相邻两个凹形结构之间距离与显示器子像素横向间距相同.出射面为凸形自由曲面(凸柱透镜)光栅结构,该光栅结构倾斜放置,倾斜角度为 $\arctan 1/3$,其节距由裸眼 3D 显示视点决定.显示器子像素发出的发散角很小的垂直显示屏光束通过新型柱透镜光栅后转换为定向投射的特殊光束.通过采用特殊结构的背光源,RGB 子像素发出的在水平方向发散角很小的垂直显示屏光束经凹形自由曲面折射后,将矩形子像素变换为宽度很窄(准线形)的子像素虚像,再经凸形自由曲面折射变换为定向准直光束,如图 1(a)所示.该结构设计的目的是当 RGB 子像素变换为准线形子像素虚像后,倾斜放置的凸柱透镜使不同视角看到的图像子像素只有该视角的子像素,而没有相邻子像素的干扰,如图 1(b)所示.图中视角 2 看到的子像素只有标示为“2”的 RGB 子像素虚像,相邻视角 1、3 的子像素虚像基本没有进入视角 2,不会产生串扰.相比之下,图 1(c)所示的传统柱透镜光栅裸眼 3D 显示面板的视角 2 看到的子像素不仅包含标示“2”的 RGB 子像素,还包含相邻视角 1、3 的 RGB 子像素,存在明显串扰.

为了获得最佳新型透镜设计,采用非球面设计.首先通过推导新型裸眼 3D 柱透镜设计公式,利用 MATLAB 工具编程求出柱透镜横截面曲线上的点,再导入到 SolidWorks 软件中对其进行曲线拟合得到横截面曲线和 3D 模型.然后根据相同视角的子像素光线汇聚在同一视场的要求,设计相应的柱透镜阵列.

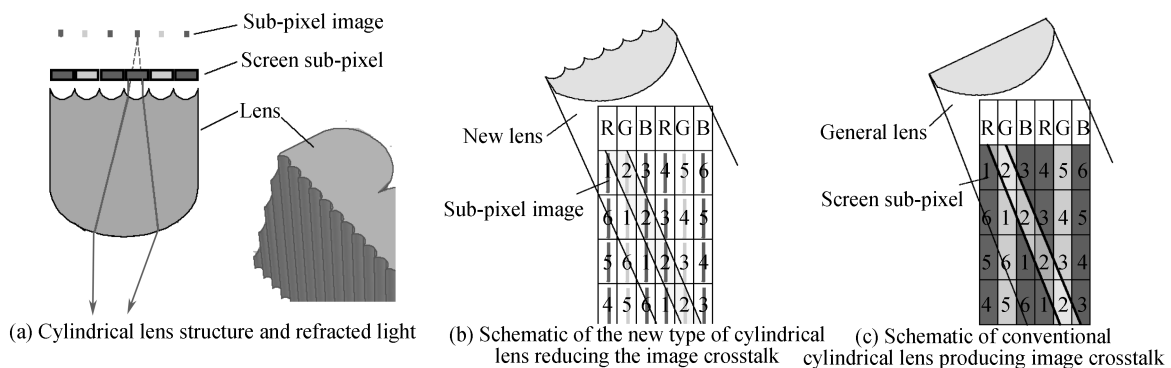


图 1 低串扰裸眼 3D 显示柱透镜光栅结构和工作原理

Fig.1 Schematic diagram of the working principle of low-crosstalk, naked-eye 3D display cylindrical lens grating

1.1 背光源结构原理

在倾斜柱镜光栅式裸眼 3D 显示器中,水平方向与显示屏法线夹角较大的光线不但不能被利用,而且由此产生的串扰还会随视点数的增加而增加^[14].因此,为减小串扰,提高背光利用率,可以在倾斜柱镜光栅式裸眼 3D 显示器中采用一种特殊结构的背光源结构^[15],使 LCD 背光源的光线在水平方向以接近垂直显示屏的方向射出,如图 2 所示.背光源包括一块上表面具有等腰三角形光栅微结构的导光板和一片下表面同样具有等腰三角形光栅微结构的光栅膜,两侧 LED 光源进入导光板的光线通过导光板上的等腰三角形斜边折射进入光栅膜上的等腰三角形的一个斜边并通过另一个斜边全反射,从而实现背光输出.当导光板上的等腰三角形顶角 φ 大于光栅膜上的等腰三角形顶角 θ 时,光线就能在水平方向上以与显示屏法线夹角较小的角度射出,合理设计 φ 和 θ 值,就能使光线以接近垂直显示屏的方向射出,即图中 β 接近 0° .

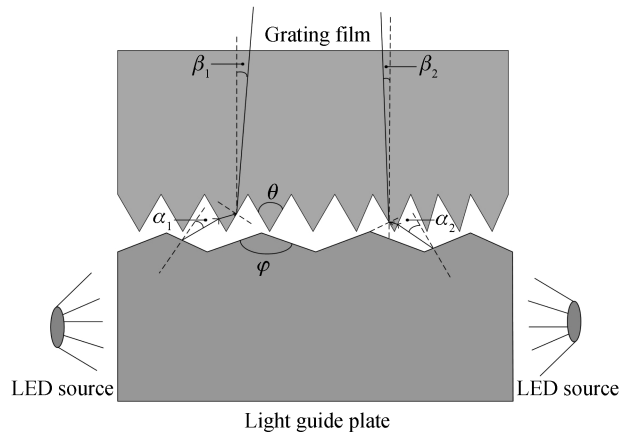


图 2 出射光线接近垂直显示屏的背光源结构
Fig.2 Schematic diagram of the backlight with outgoing light close to the vertical display

1.2 柱透镜入射面单元设计原理

如图 1 所示,柱透镜入射面单元设计为凹面,每一个凹面对应一个 RGB 子像素,它们的中心点在同一条光轴线上,横截面如图 3.设子像素平面与柱透镜入射凹面顶点距离为 l ,背光源采用上述定向背光源,由于背光源的光线以接近垂直显示屏的方向射出,子像素发出的光束可近似为发散角很小的平行光束,子像素发光面上每一点发出的光线都在法线方向上为最强,且中心对称,所以设计柱透镜入射面单元时只考虑法线光线.图 3 中,RGB 子像素平面的法向光线都平行于 x 轴,所有像素平面法向光线经过凹面折射后全部变换为由子像素虚像 O 点发出的光线,入射凹面的形状由光线的分布情况决定.由于柱透镜是轴对称的,所以只需求出入射凹面横截面曲线即可^[16-17].

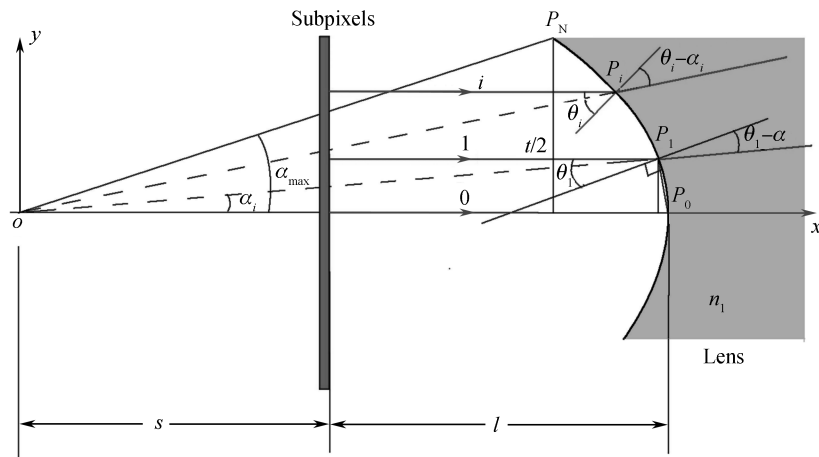


图 3 凹形自由曲面入射面设计原理
Fig.3 Schematic diagram of concave incidence surface

以子像素虚像 O 为原点建立坐标系,如图 3 所示. P_i 为入射凹面横截面曲线上的取样点, OP_i 连线与 x 轴的夹角为 α_i .微小角度 α_1 对应曲线上的点 P_1 ,以 α_1 作为角度增量等间隔增大 α_i ,因此 α_i 可表示为

$$\alpha_i = i \cdot \alpha_1 \quad (i = 1, 2 \dots N) \quad (1)$$

设柱透镜材料的折射率为 n_1 ,根据 Snell 定律可求得光线 1 经过 P_1 点折射后的关系式

$$\sin(\theta_1) = n_1 \cdot \sin(\theta_1 - \alpha_1) \quad (2)$$

P_0 点坐标为 $(s+l, 0)$,由于 P_1 和 P_0 两点距离很近,可以将线段 P_1P_0 的方向近似为 P_1 点的切向方

向,因此 P_1 点坐标 (x_{1P}, y_{1P}) 可由式(3)得到

$$\begin{cases} y_{1P} = (s + l - x_{1P}) \cot \theta_1 \\ y_{1P} = x_{1P} \tan(\alpha_1) \end{cases} \quad (3)$$

根据式(1)~(3)即可求得 P_1 点的坐标 (x_{1P}, y_{1P})

$$\begin{cases} x_{1P} = \frac{(s + l) \cot \theta_1}{\tan(\alpha_1) + \cot \theta_1} \\ y_{1P} = x_{1P} \tan(\alpha_1) \end{cases} \quad (4)$$

同理可得 P_i 点坐标 (x_{iP}, y_{iP}) 的计算式为

$$\begin{cases} \sin(\theta_i) = n_1 \cdot \sin(\theta_i - \alpha_i) \\ y_{iP} - y_{(i-1)P} = [x_{(i-1)P} - x_{iP}] \cot \theta_i \\ y_{iP} = x_{iP} \tan(\alpha_i) \end{cases} \quad (5)$$

由式(4)可以依次求出入射凹面横截面曲线上的其他所有取样点 P_i , P_i 点坐标为

$$\begin{cases} x_{iP} = \frac{x_{(i-1)P} \cot \theta_i + y_{(i-1)P}}{\tan(\alpha_i) + \cot \theta_i} \\ y_{iP} = x_{iP} \tan(\alpha_i) \end{cases} \quad (6)$$

若 RGB 子像素宽度为 t , 则 P_N 点坐标 y_N 的最大取值为 $t/2$, 因入射凹面横截面曲线以 x 轴为对称轴上下对称, 所以求得 x 轴以上 $y > 0$ 的曲线点坐标就可得到 $y < 0$ 的曲线点坐标.

1.3 柱透镜出射面单元设计原理

柱透镜出射面单元的作用是将多视点图像的 RGB 子像素发出的光束投射到特定角度的视点位置^[18-24], 如图 4 所示, 设视点数为 m , 每个柱透镜出射面对应 m 个子像素, 出射面横截面曲线为凸形自由曲线. 光束投射角度 δ_0 由视点坐标 (x_v, y_v) 决定

$$\delta_0 = \arctan \left[\frac{y_v}{x_v - (s + l + h)} \right] \quad (7)$$

式中 h 为柱透镜入射凹面顶点与出射凸面顶点的垂直距离 (约为柱透镜光栅板的厚度). 由于离轴光线的像差大于轴上光线, 因此柱透镜出射面自由曲线的设计主要针对离轴子像素进行设计, 对于视点数为 m 的柱透镜, 离轴距离最大的子像素虚像与柱透镜出射面中心轴线的距离为 $(m-1)t/2$, 设离轴距离最大的子像素虚像发出的光线经过柱透镜出射面顶点 Q_M 的光线与轴向 (x 轴) 的夹角为 φ_0 , 则有

$$\varphi_0 = \arctan \left[\frac{(m-1)t}{2(s+l+h)} \right] \quad (8)$$

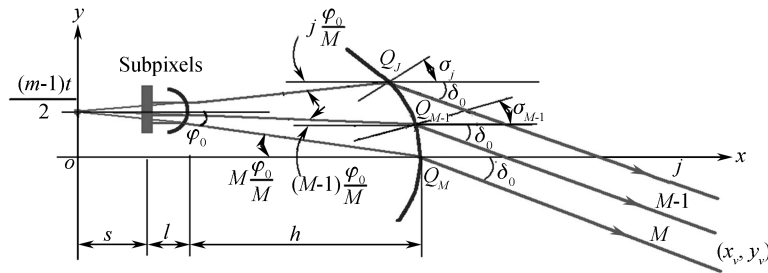


图 4 凸形自由曲面出射面设计原理

Fig.4 Schematic diagram of the outgoing convex free-form surface

由图 3 可知, φ_0 即为出射面顶点光线 M 的入射角, 根据 Snell 定律可求得此光线经过 Q_M 点折射后的关系式

$$\sin \delta_0 = n_1 \cdot \sin \varphi_0 \quad (9)$$

将 φ_0 均匀 M 等分, 以 φ_0/M 为增量改变光线方向, 则光线在 Q_{M-1} 点的折射关系式为

$$\sin(\delta_0 + \sigma_{M-1}) = n_1 \cdot \sin(\sigma_{M-1} + (M-1)\varphi_0/M) \quad (10)$$

光线 j 在 Q_j 点的折射关系式为

$$\sin(\delta_0 + \sigma_j) = n_1 \cdot \sin(\sigma_j + j\varphi_0/M) \quad (j = \pm 1, \pm 2 \dots \pm M) \quad (11)$$

Q_M 点坐标为 $(s+l+h, 0)$, 将线段 $Q_{M-1}Q_M$ 的方向近似为 Q_{M-1} 点的切线方向, 则 Q_{M-1} 点坐标 $(x_{Q(M-1)}, y_{Q(M-1)})$ 为

$$\begin{cases} y_{Q(M-1)} = (s+l+h - x_{Q(M-1)}) \cot \sigma_{M-1} \\ y_{Q(M-1)} = \frac{(m-1)t}{2} - x_{Q(M-1)} \operatorname{can} \left[(M-1) \frac{\varphi_0}{M} \right] \end{cases}$$

由此推得 Q_{j-1} 点坐标 $(x_{Q(j-1)}, y_{Q(j-1)})$ 为

$$\begin{cases} y_{Q(j-1)} - y_{Qj} = (x_{Qj} - x_{Q(j-1)}) \cot \sigma_{j-1} \\ y_{Q(j-1)} = \frac{(m-1)t}{2} - x_{Q(j-1)} \operatorname{can} \left[(j-1) \frac{\varphi_0}{M} \right] \end{cases} \quad (j = \pm 1, \pm 2 \cdots \pm M) \quad (12)$$

最后得

$$\begin{cases} x_{Q(j-1)} = \frac{x_{Qj} \cot \sigma_{j-1} - \frac{(m-1)t}{2} - y_{Qj}}{\left\{ \cot \sigma_{j-1} + \operatorname{can} \left[(j-1) \frac{\varphi_0}{M} \right] \right\}} \\ y_{Q(j-1)} = \frac{(m-1)t}{2} - \frac{\operatorname{can} \left[(j-1) \frac{\varphi_0}{M} \right] \left[x_{Qj} \cot \sigma_{j-1} - \frac{(m-1)t}{2} - y_{Qj} \right]}{\left\{ \cot \sigma_{j-1} + \operatorname{can} \left[(j-1) \frac{\varphi_0}{M} \right] \right\}} \end{cases} \quad (13)$$

式中, $j = \pm 1, \pm 2 \cdots \pm M$.

据式(7)~(13)可求得图 4 中出射面横截面自由曲线上各点坐标, 由于曲线为上下对称, 因此求得曲线上半部分即可. 用 MATLAB 编程求解, 再导入到 SolidWorks 中画出 3D 模型.

1.4 柱透镜光栅节距设计原理

前置柱透镜式裸眼 3D 显示屏的柱透镜阵列光栅将屏上水平方向不同位置的像素投射到同一个视点, 图 5 为 m 视点的柱透镜阵列光路示意图, 图中 b 为柱镜光栅出射面节距, t 为柱镜光栅入射面节距, L 为观看距离, 同一视图相邻两个像素的子像素虚像 O_k 和 O_{k+1} 发出的光线通过柱透镜阵列投射到视点 V_1 上, 光束投射角度分别为 δ_k 和 δ_{k+1} , 可得

$$L \tan(\delta_{k+1}) = L \tan(\delta_k) + b \quad (14)$$

由式(9)可得

$$\sin(\delta_k) = n_1 \cdot \sin(\varphi_k), \sin(\delta_{k+1}) = n_1 \cdot \sin(\varphi_{k+1}) \quad (15)$$

由于角度 φ_k, φ_{k+1} 很小, 式(15)可写为

$$\sin(\varphi_k) \approx \tan(\varphi_k) = \frac{(m-1)t}{2(s+l+h)}, \sin(\varphi_{k+1}) \approx \tan(\varphi_{k+1}) = \frac{(3m-1)t - 2b}{2(s+l+h)} \quad (16)$$

又由于 $L \gg b$, 所以有

$$\tan(\delta_k) \approx \sin(\delta_k), \tan(\delta_{k+1}) \approx \sin(\delta_{k+1}) \quad (17)$$

由式(14)~(17)得

$$b = \frac{mLn_1}{(s+l+h) + Ln_1} t \quad (18)$$

式(18)表明柱透镜阵列光栅的出射面节距 b 是入射面节距 t 的 $mLn_1 / [(s+l+h) + Ln_1]$ 倍.

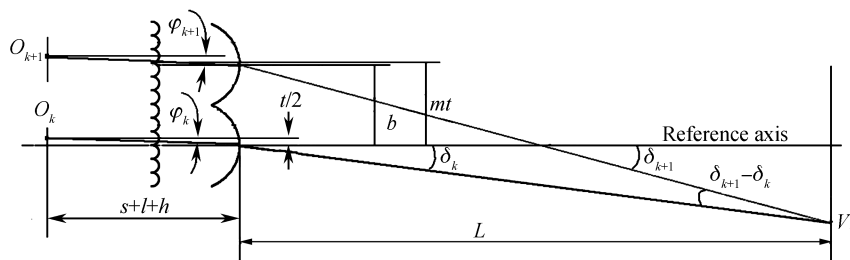


图 5 柱透镜阵列光栅周期设计原理

Fig.5 Schematic of cylindrical lens array grating cycle

2 模拟仿真与参数优化

2.1 仿真模型与初始参数

本文设计的目的是将 LCD 显示屏上的矩形 RGB 子像素通过凹柱透镜阵列光栅变换为近似线形的子像素虚像,再经过倾斜凸柱透镜阵列光栅均匀投射到视点平面上,避免传统倾斜柱透镜光栅型 3D 显示器串扰严重的问题.仿真实验验证设计中,首先设计柱透镜阵列单元的入射面和出射面横截面曲线,根据式(6)计算入射面凹面曲线,根据式(13)计算出射面曲线;然后,将设计好的柱透镜阵列单元用 TracePro 进行参数优化,使串扰达到最小;最后,根据式(18)设计柱透镜阵列,进行仿真验证.

以 55 英寸 4K 电视的 6 视点斜置柱透镜阵列光栅的设计为例,LCD 显示屏的 RGB 像素中心距离为 0.3 mm,相邻两个子像素中心距离为 0.1 mm (像素中心距离对于不同显示屏有不同取值,但不影响下述内容的讨论).仿真实验初始参数为:裸眼 3D 柱透镜阵列光栅的内表面凹面光栅节距 $t = 0.1$ mm,子像素虚像、子像素和凹柱透镜的距离参数 $s = l = 0.5$ mm,柱透镜厚度 $h = 1.5$ mm,折射率 $n_1 = 1.49$ (PMMA 材料),视点数 $m = 6$,观看距离 $L = 2\ 000$ mm,根据(18)式可求得柱透镜阵列光栅板的外表面凸面光栅节距为 $b = 0.599$ mm,凸面光栅倾斜 18.43° ^[5].设计的柱透镜阵列光栅局部 3D 模型如图 6 所示,将设计好的模型导入 TracePro 软件进行光线追迹仿真和优化.

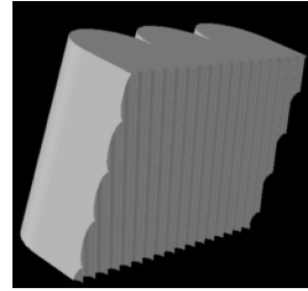


图 6 6 视点斜置柱透镜阵列光栅模型
Fig.6 Model of 6-view image of slanted cylindrical lens grating

2.2 参数的验证和优化

倾斜柱透镜光栅式裸眼 3D 显示的关键技术指标是图像串扰度,因此设计优化的依据是使图像串扰度达到最小,图像主要串扰来自相邻视图图像进入主图像的光强度,柱透镜光栅阵列所观察到的图像串扰度可以定义^[14]为

$$\text{crosstalk} = I_{\text{leakage}} / I_{\text{signal}} \quad (19)$$

式中, I_{leakage} 是泄漏到错误视区的光强度, I_{signal} 是正确视区的光强度.

根据上述初始参数建模,采用光学仿真软件 Tracepro 进行模拟实验.接收屏置于观看距离 2 000 mm 处,新型斜置柱透镜光栅裸眼 3D 显示 6 视点仿真结果见图 7,包括光强分布曲线及串扰度分布曲线.图 8 为传统斜置柱透镜光栅的裸眼 3D 显示 6 视点仿真光强分布曲线及串扰度曲线.对比图 7(a)和图 8(a)可以看到,光强分布曲线中相邻两视角的交叉点高度前者为 0.2~0.25 之间,后者为 0.55~0.6 之间.由于相邻两视角的光强分布曲线交叉点高度越低,图像串扰度就越低,这说明新型斜置柱透镜光栅优于传统斜置柱透镜

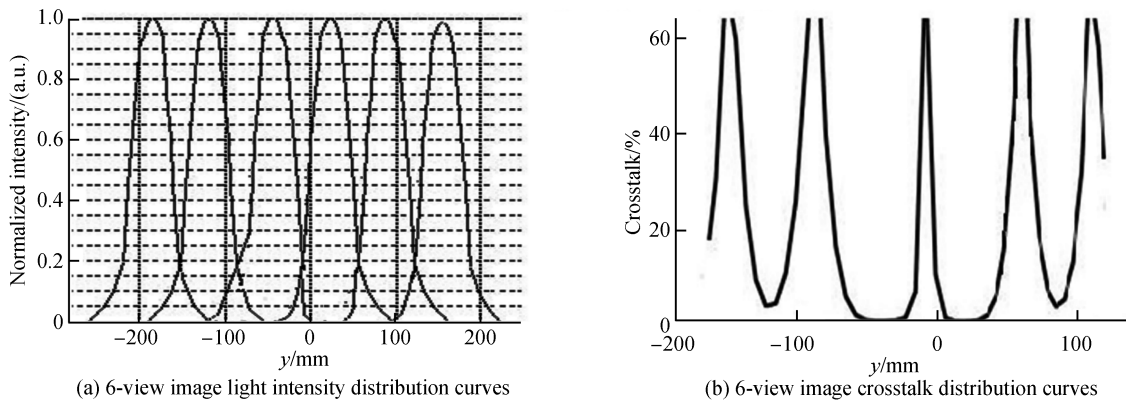


图 7 参数优化前的新型斜置柱透镜光栅光强分布曲线和串扰度分布曲线

Fig.7 Curves of light intensity and crosstalk distribution of a new slanted cylindrical lens grating before parameter optimization

光栅.再对比图 7(b)和图 8(b)的串扰度分布曲线,新型斜置柱透镜光栅的中心最低串扰接近为 0,而传统斜置柱透镜光栅的中心最低串扰接近 20%.同时,可以看到,新型斜置柱透镜光栅的低串扰分布区域大于传统斜置柱透镜光栅.

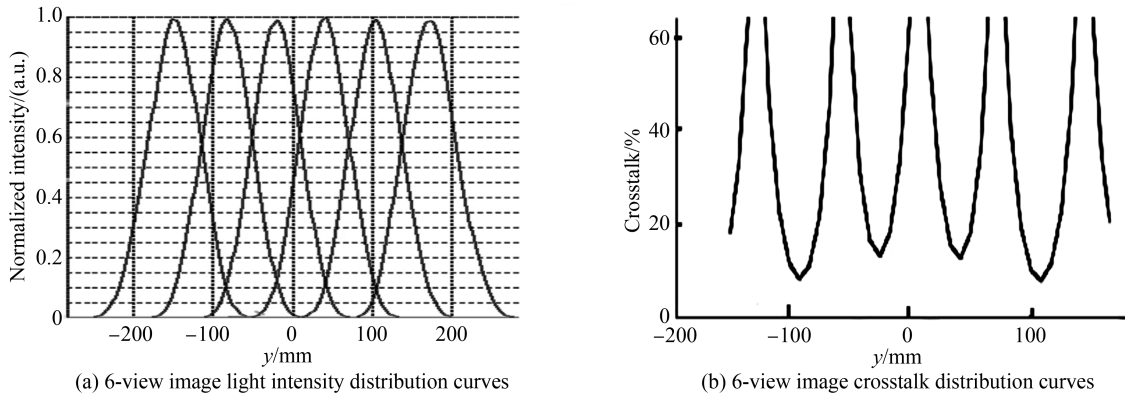


图 8 传统斜置柱透镜光栅光强分布曲线和串扰度分布曲线

Fig.8 Intensity distribution curves and crosstalk distribution curves of conventional slanted cylindrical lens grating

图 9 给出了当 $s=l=0.5\text{mm}$, $L=2\ 000\ \text{mm}$ 时,微调透镜厚度 h 得到的串扰度曲线,虽然基本不变,但还是可以看到当 $h=1.5\ \text{mm}$ 时,低串扰度区域最大,因此初始参数 $h=1.5\ \text{mm}$ 是较优值,由于在微调范围内串扰度曲线随透镜厚度 h 的变化很小,所以无需再细化 h 的取值.

确定透镜厚度 h 之后,微调液晶子像素与透镜之间的距离 l ,比较它们对串扰度的影响.图 10 给出了不同距离 l 下的 6 视点图像串扰度分布曲线.由图可知,不同 l 值对图像串扰度有一定影响,当 $l=0.3\ \text{mm}$ 时,各个视区的低串扰度区域更大,因此参数 $l=0.3\ \text{mm}$ 较优.如果继续细化 l 的取值,则可以得到 l 的最优值.

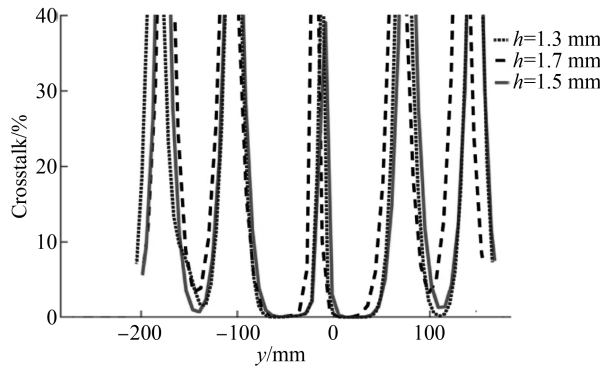


图 9 新型斜置柱透镜光栅的图像串扰度分布曲线随参数 h 的变化

Fig.9 The image crosstalk distribution curves of a new slanted cylindrical lens grating changing with the parameter

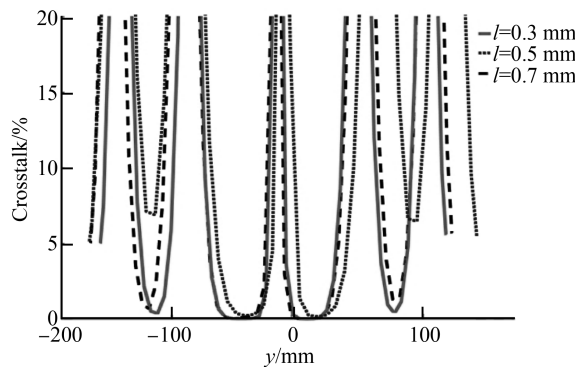


图 10 新型斜置柱透镜光栅的图像串扰度分布曲线随参数 l 的变化

Fig.10 The image crosstalk distribution curves of the new slanted cylindrical lens grating changing with the parameter l

对经过上述优化后的新型斜置柱透镜光栅模型进行观看距离模拟仿真,发现在 $2\ 000\ \text{mm}\sim 3\ 000\ \text{mm}$

范围内图像串扰度基本不变,串扰度分布曲线如图 11.由图可知,随着观看距离增大,最佳视角的串扰度只略微变大,但都低于 2%,低串扰视区范围只稍微变小.

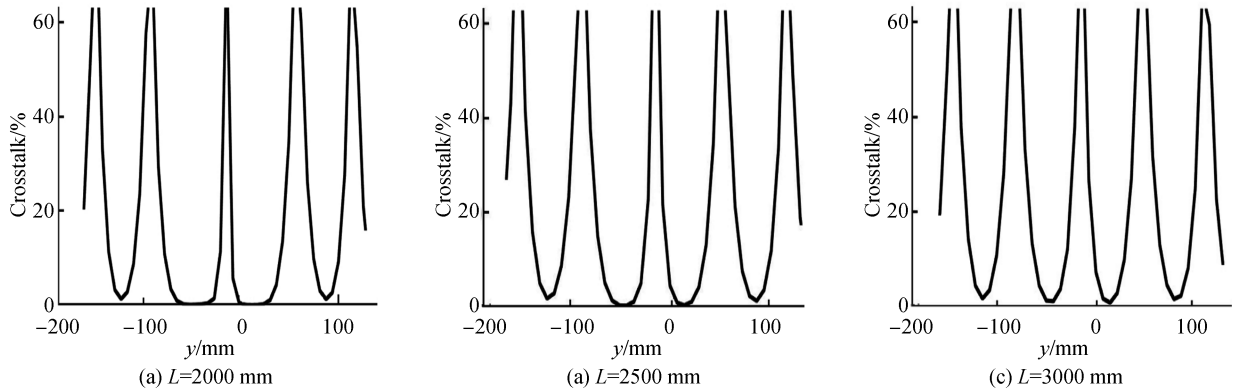


图 11 不同观看距离下的串扰度曲线对比

Fig.11 Comparison of crosstalk curves at different viewing distances

优化后的 55 英寸 4K 液晶电视柱镜式裸眼 3D 显示屏的新型 6 视点斜置柱透镜光栅板参数为:柱透镜参数,入射面为凹形自由曲面,光栅节距, $t = 0.1 \text{ mm}$,出射面为凸形自由曲面,光栅节距 $b = 0.599 \text{ mm}$;凸面光栅倾斜 18.43° ,透镜厚度 $h = 1.5 \text{ mm}$;位置参数,液晶子像素与凹形自由曲面距离 $l = 0.3 \text{ mm}$,观看距离 $L = 2\ 000 \text{ mm} \sim 3\ 000 \text{ mm}$.视点中心最低图像串扰度为 0.068% ,而传统斜置柱透镜光栅产生的图像串扰大,视点中心最低图像串扰度为 7.76% .可见新型 6 视点斜置柱透镜光栅与传统 6 视点斜置柱透镜光栅的最佳视角图像串扰度相比降低了 2 个数量级,如图 12 所示.

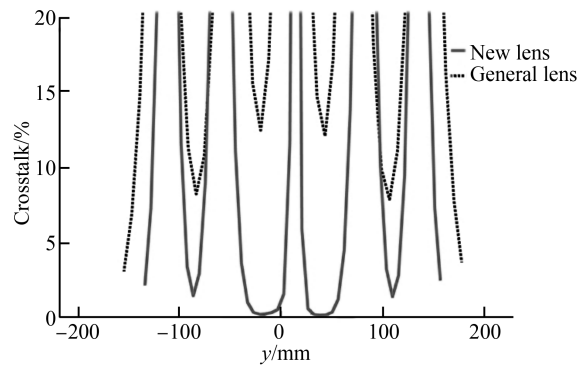


图 12 新型光栅与传统光栅的串扰度分布曲线对比

Fig.12 Comparison of crosstalk distribution curves between the new and a conventional lens grating

3 实物模型实验

软件仿真优化后的裸眼 3D 显示新型斜置柱镜光栅面板通过一个实物放大模型(放大 20 倍)进行实验观察,因为放大的实物模型加工精度要求低,制作容易、成本较低.实物模型包括 1 块亚克力凹柱透镜阵列光栅板和 1 块亚克力凸柱透镜阵列光栅板,实验观察结果如图 13.图 13(a)是液晶显示器放大 20 倍的像素形状照片和 6 视点 RGB 子像素排列顺序图,将凹柱透镜光栅板按照放大 20 倍的距离放在该 RGB 像素图上观察,结果如图 13(b),可看出矩形 RGB 子像素经过凹柱透镜阵列后像素宽度明显变窄,再将凸柱透镜阵列光

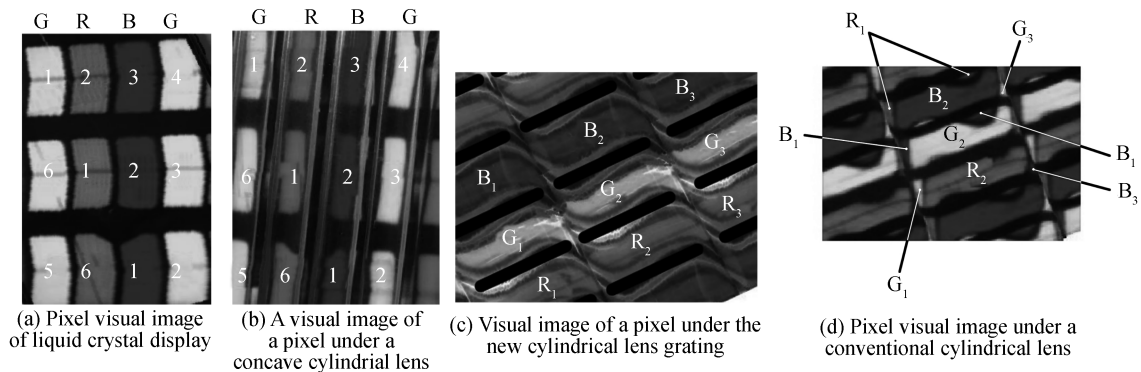


图 13 新型斜置柱透镜光栅与传统斜置柱透镜光栅的图像像素视觉实验对比

Fig.13 Experimental comparison of the image pixel vision of the new slanted cylindrical lens grating with a conventional slanted cylindrical lens grating

栅板倾斜 18.43° 叠加在凹柱透镜阵列板上,在最佳视点位置(放大 20 倍为 40 m)看到的该视点图像子像素照片如图 13(c)所示(通过望远镜拍照),可见相邻子像素干扰基本得到消除,图中视角 2 看到的子像素只有标示为“2”的 RGB 子像素,相邻视角 1、3 的子像素基本没有进入视角 2,不会产生串扰。为了对比,实验同时制作了放大 20 倍的传统斜置半圆柱形透镜阵列光栅板,RGB 像素观察结果如图 13(d)所示的照片,可见传统柱透镜光栅裸眼 3D 显示的视角 2 看到的子像素不仅包含标示“2”的 RGB 子像素,还包含相邻视角 1、3 的 RGB 子像素,存在明显串扰。

4 结论

根据柱镜式裸眼 3D 显示原理和几何光学原理,通过对裸眼 3D 显示柱透镜光栅的入射面和出射面进行光线分析,提出一种新型双面柱透镜光栅结构,将柱透镜光栅面板的入射面设计为等间距排列的与显示器子像素数量相同的凹形自由曲面光栅结构,推导出自由曲面柱透镜设计方程组,运用 MATLAB 工具编程求出柱透镜入射面和出射面横截面曲线上的离散点,再导入到 SolidWorks 软件中对其进行曲线拟合得到 3D 模型,最后通过 TracePro 软件对设计模型进行光线追迹实现参数优化,优化后的结构参数为:入射面为凹形自由曲面,光栅节距 $t=0.1$ mm,出射面为凸形自由曲面,光栅节距 $b=0.599$ mm,凸面光栅倾斜 18.43° ,子像素虚像到 LCD 像素平面的距离 $s=0.5$ mm,像素平面与柱透镜入射凹面顶点距离 $l=0.3$ mm,柱透镜厚度 $h=1.5$ mm。仿真结果表明,参数优化后的 6 视点斜置柱透镜双面光栅 3D 显示在最佳视角的图像串扰度为 0.068%,与传统 6 视点斜置柱透镜光栅的最佳视角图像串扰度相比降低了 2 个数量级,并且在观看距离 2 000 mm~3 000 mm 范围内图像串扰度基本不变。

参考文献

- [1] SHEN Y T, LIU G L, WU S S, *et al.* 3-D perception enhancement in autostereoscopic TV by depth cue for 3-D model interaction[C]. IEEE International Conference on Consumer Electronics, 2016: 279-282.
- [2] ZHOU Lei, TAO Yu-hong, WANG Qiong-hua, *et al.* Design of lenticular lens in autostereoscopic display[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1): 30-33.
周磊,陶宇虹,王琼华,等. 立体显示用柱面透镜光栅的设计[J]. 光子学报, 2009, **38**(1): 30-33.
- [3] EZHOV V. Optical layout of auto-stereoscopic display that simultaneously reproduces two views each with full-screen resolution[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(36): 8449-55.
- [4] HUANG Qing-min. Multi-view naked eye 3D TV technology[J]. *International Electronic Elements*, 2015, **23**(3): 191-193.
黄庆敏. 多视角裸眼 3D 电视的技术实现[J]. 电子设计工程, 2015, **23**(3): 191-193.
- [5] HOU Chun-ping, WANG Xiao-yan. Crosstalk ratio evaluation of autostereoscopic display based on the slanted parallax barrier[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2012, **45**(8): 663-668.
侯春萍,王晓燕. 基于倾斜狭缝光栅的自由立体显示串扰比[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2012, **45**(08): 663-668.
- [6] HOU Chun-ping, XU Guo, SHEN Li-li. Analysis of viewing zone and simulation of the crosstalk based on multi-view autostereoscopic display[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(5): 0512001.
侯春萍,许国,沈丽丽. 多视点自由立体显示串扰分析与视区仿真[J]. 光子学报, 2014, **43**(5): 0512001.
- [7] FUKUSHIMA R, TAIRA K. Effect of light ray overlap between neighboring parallax images in autostereoscopic 3D displays[C]. SPIE, 2009, **7237**: 72370w.
- [8] WU C L, HUANG K C, LIAO C C, *et al.* Autostereoscopic display optical properties evaluation[C]. SPIE, 2010, **7524**(2): 75241L.
- [9] LEE C, SEO G, LEE J, *et al.* Auto-stereoscopic 3D displays with reduced crosstalk[J]. *Optics Express*, 2011, **19**(24): 24762-24774.
- [10] HANHART P, NOLFO C D, EBRAHIMI T. Active crosstalk reduction system for multiview autostereoscopic displays [C]. IEEE International Conference on Multimedia and Expo, 2015.
- [11] LIANG H, AN S, WANG J, *et al.* Optimizing time-multiplexing auto-stereoscopic displays with a genetic algorithm [J]. *Journal of Display Technology*, 2014, **10**(8): 695-699.
- [12] LI Xiao-fang, WANG Qiong-hua, LI Da-hai, *et al.* A method to eliminate image crosstalk in autostereoscopic display based on lenticular sheet[J]. *Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*, 2011, **43**(6): 115-118.
李小方,王琼华,李大海,等. 一种消除柱透镜光栅自由立体显示图像串扰的方法[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, **43**(6): 115-118.
- [13] ZHAO W X, WANG Q H, WANG A H, *et al.* Autostereoscopic display based on two-layer lenticular lenses[J].

- Optics Letters*, 2010, **35**(24): 4127-4129.
- [14] CHANGY C, TANG L C, YIN C Y, *et al.* Efficient simulation of intensity profile of light through subpixel-matched lenticular lens array for two- and four-view auto-stereoscopic liquid-crystal display[J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(25): A356.
- [15] WANG Zhi-yuan, HOU Chun-ping. Crosstalk elimination in multi-view autostereoscopic display based on polarized lenticular lens array[J]. *Chinese Physics B*, 2015, **24**(1): 014213.
- [16] 任百川. 偏轴光学系统矢量像差理论研究[D]. 长春:中国科学院大学(长春光学精密机械与物理研究所),2012.
- [17] LAU Li-ping, ZHUANG Qi-ren, LIANG De-juan, *et al.* Investigation of uniform illumination of the near-field on the lateral panels using LED projectors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(3): 220-226.
赖丽萍,庄其仁,梁德娟,等. 基于近场侧面均匀照明的LED投射器研究[J]. *光学学报*,2014,**34**(3):220-226.
- [18] YU Ying-jie, CAI Ming-yi, ZHANG Zhi-jiang. Analysis for geometric parameter relation of lenticular sheet based autostereoscopic[J].*Optoelectronic Technology*, 2010, **30**(1): 10-15.
于瀛洁,蔡明义,张之江. 柱透镜光栅自由立体显示中几何参数间关系分析[J]. *光电子技术*,2010,**30**(1):10-15.
- [19] BI Jia-yu, ZHANG Zhi-jiang, DONG Zhi-hua. System modeling and analysis for automultiscopic 3D displays[J]. *Optical Technique*, 2009, **35**(4): 575-578.
毕家瑜,张之江,董志华. 多视点立体显示系统建模及分析[J]. *光学技术*,2009,**35**(4):575-578.
- [20] LI D, ZANG D, QIAO X, *et al.* 3D synthesis and crosstalk reduction for lenticular autostereoscopic displays[J]. *Journal of Display Technology*, 2015, **11**(11): 939-946.
- [21] FAN H, ZHOU Y, WANG J, *et al.* Glasses-free 3D display with glasses-assisted quality: key innovations for smart directional backlight autostereoscopy[J]. *IEEE: Visual Communications & Image Processing*, 2016.
- [22] FAN H, ZHOU Y, WANG J, *et al.* full resolution, low crosstalk, and wideviewing, angle auto-stereoscopic display with a hybrid, spatial-temporal control using free-form surface backlight unit[J]. *Journal of Display Technology*, 2015, **11**(7): 1.
- [23] YANG Lan, ZENG Xiang-yao, ZOU Wei-dong, *et al.* Image synthesis and realization of embedded 3D display system based on interpretation algorithm[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2016, **37**(10): 1237-1244.
杨兰,曾祥耀,邹卫东,等. 基于插值算法的立体显示的图像合成与嵌入式实现[J]. *发光学报*,2016,**37**(10):1237-1244.
- [24] WANG Ai-hong, LI Xiao-fang, TAO Miao-miao, *et al.* Crosstalk ratio of the lenticular-lens-based autostereoscopic display[J]. *Journal of Henan Normal University(Natural Science)*, 2015(6): 50-53.
王爱红,李小方,陶苗苗,等. 柱透镜光栅立体显示的串扰度[J]. *河南师范大学学报(自然科学版)*,2015(6):50-53.