

文章编号:1007-2780(2013)03-0330-08

柱透镜光栅投影 3D 显示的视点数与串扰容限

田 华, 曾小名, 戴涛涛, 黄子强*

(电子科技大学 电子科学技术研究院, 四川 成都 610054, E-mail: thua1987@sina.com)

摘 要: 柱透镜光栅投影 3D 显示系统由定向反射屏(包括柱透镜光栅和漫反射屏)和若干个投影仪组成, 可实现多视点不同立体图像的显示。为了确定该系统可设置的投影仪个数、可实现的视点个数、串扰以及较小串扰前提下视点的宽度, 文中通过分析柱透镜光栅投影式 3D 的显示原理, 给出了单个投影仪主视区距离的计算公式, 同时给出了单个投影仪主视区宽度的计算公式, 并利用 TracePro 光学仿真软件验证了公式的准确性。由主视区距离进一步得到了该 3D 显示系统中可设置的投影仪个数及视点个数, 并根据主视区宽度及视点个数分析了串扰大小、每个 3D 观看视点的宽度。文中给出的实际设计参数举例中, 都实现了 8~20 个 3D 观看视点。当主视区宽度接近人眼瞳孔距离(取 65 mm)时, 可实现串扰小于 10% 的前提下, 每个视点宽度达到 40 mm 左右。

关 键 词: 自由立体显示; 多视点投影式 3D 显示; 柱透镜光栅; 定向反射屏; 球差

中图分类号: TN23; TP31 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/YJYXS20132803.0330

Problems about Number of Views and Crosstalk Tolerance in Projective Auto-Stereoscopic Display Based on Lenticular Grating

TIAN Hua, ZENG Xiao-ming, DAI Tao-tao, HUANG Zi-qiang*

(Research Institute of Electronic Science and Technology, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China, E-mail: thua1987@sina.com)

Abstract: This projective autostereoscopic display system based on cylindrical lens grating is composed with orientation-reflecting screen (consists of lenticular grating and diffuse-reflecting screen) and several projectors. It can provide multi-view display and each view has different stereoscopic image. By the analysis of the display principle of this system, the formula of the distance between single projector's primary view port and secondary view port and the formula of the width of primary view port are given. It is given to make sure how many projectors and view ports can be set, how much the crosstalk is, and how much the width of view port under smaller crosstalk is. The accuracy of the formulas confirmed by TracePro. View ports 8~20 are realized in design examples. On the precondition of the crosstalk's each view port is less than 10%, the width of the primary view port is close to the papillary distance and the width of each 3D view port can reach about 40 mm.

Key words: autostereoscopic display; projective multi-view 3D display; cylindrical lens grating; orientation-reflecting screen; spherical aberration

收稿日期: 2012-11-23; 修订日期: 2013-03-24

作者简介: 田华(1987—), 男, 四川中江人, 硕士研究生, 主要从事裸眼 3D 方面的研究。

* 通信联系人, E-mail: zqhuang@188.com

1 引言

3D 显示是近年来显示领域研究的一个热点,其基本原理^[1]是通过眼镜、头盔、光栅等的分光作用使左右眼图像分别进入人的左右眼,通过大脑合成立体图像。目前市面上比较常见的 3D 显示器都是需要佩戴眼镜的,利用分光、分色或分时技术来实现 3D 显示^[2-4]。这种实现方式的 3D 显示必然给人带来诸多不便。在自由立体显示技术方面,目前也出现了狭缝式光栅自由立体显示技术和柱透镜式光栅自由立体显示技术^[2-6],这两种技术都是利用光栅的定向分光作用,使左、右眼图像分别进入人的左、右眼,实现自由立体显示。将狭缝光栅、柱透镜光栅跟投影技术相结合,可实现投影式 3D 显示^[7-9]。狭缝式光栅投影 3D 显示利用挡板遮挡吸收部分像素发出的光以实现定向分光的作用,如右眼像素发出的光被挡板遮挡吸收后不会到达左眼图像的观看视区,这种方式必将导致图像分辨率和亮度的下降。不同于狭缝光栅利用挡板对光的遮挡吸收,柱透镜光栅投影式 3D 显示是以柱面镜对光的折射作用实现定向分光的作用,保留了原图像的分辨率(漫反射屏上形成的焦线保留了投影仪的所有图像信息),并且相比于普通投影显示,视区由屏幕前整个空间汇聚为宽度很窄的视区,图像在亮度上会有很大的提高。目前有文章^[8]对柱透镜光栅投影自由立体显示的实现方式做了介绍,文中给出了主次视区距离的计算公式,但该公式可能因为一些因素没考虑周全,公式计算结果与 TracePro 光学仿真软件的仿真结果还存在一定的差距。

TracePro 光学仿真软件利用蒙特卡洛模拟法(随机模拟法)进行光线追迹。用离散的分布,或者光线试样传播来代替连续的光线分布传播。这些试样是以散射的分布作为概率密度随机采集的。这就使更好的光线追迹技术被用来模拟光线散射成为可能。当对大量光线进行模拟时,就能够得到值得信赖的模拟结果,与实际相吻合。

本文主要通过分析柱透镜光栅投影式 3D 的显示原理,给出了单个投影仪的主次视区距离与柱透镜的焦距、柱透镜的曲率半径等参数的关系式,同时给出了单个投影仪的主视区宽度的计算公式。主次视区距离决定了可设置的投影仪个数,进而决定了视点个数;主视区宽度影响了 3D

观看效果,如串扰大小、每个 3D 视点的宽度等。所以,确定主次视区的距离是确定该种模式投影 3D 可设置的投影仪个数及 3D 视点个数的前提,确定主视区宽度是确定左右眼串扰大小、每个 3D 视点宽度的前提。

2 理论分析

2.1 柱透镜光栅投影式 3D 成像原理

定向反射屏(包括柱透镜光栅和漫反射屏)对投影仪发出的光线的定向反射如图 1 所示,投影仪离光栅的距离相对于光栅栅距为无穷大,点光源 A 模拟投影仪发出的光对于光栅可视为平行光,这些光经过柱面透镜单元 m1,由于柱面透镜对光在水平方向的聚焦作用,所以经过柱面透镜单元 m1 的光会汇聚成一条线 A'A'',n 个柱面透镜就会形成 n 条亮线,这 n 条亮线在一个平面内,为柱透镜光栅的焦平面。在焦平面设置有一个漫

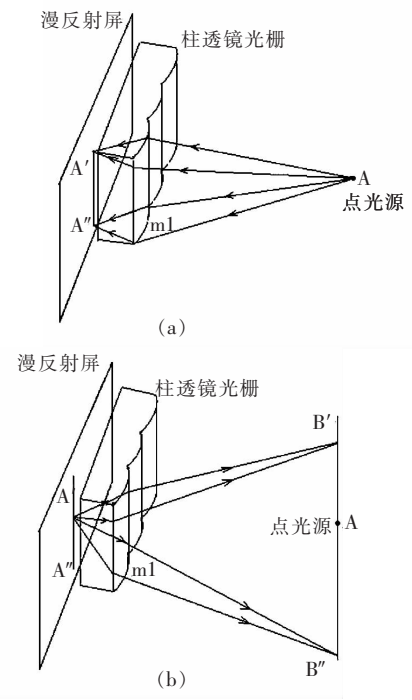


图 1 基于柱透镜光栅的投影式 3D 中光线的定向反射原理。(a)入射光汇聚成焦线示意图;(b)漫反射光汇聚示意图。

Fig. 1 Theory of directional reflection of light in projection autostereoscopic based on cylindrical lens grating. (a) Schematic configuration of incident light gather to form the focal line; (b) Schematic configuration of diffuse light gather to form the bright line.

反射屏,光线在其上发生漫发射,再经过相应的柱面透镜,如焦线漫反射后形成的反射光经过柱面透镜单元 m_1 ,并且根据在水平方向上的光路可逆定理,形成一条过 A 点的亮线 $B'B''$ 。

也就是说,投影仪发出的光经过柱透镜光栅,在位于焦平面的漫反射屏上发生反射,反射光线再经过柱透镜光栅,汇聚成一条平行于柱透镜轴线方向,并且过投影仪的亮条纹。如图 2 所示,当两台投影仪的距离为人眼瞳孔距离并且分别投影 3D 显示的左右眼图像,且人的左右眼分别位于两台投影仪的下方时,此时投影仪 1 的投影图像仅能进入人的左眼,投影仪 2 的投影图像仅能进入人的右眼,人就能看到 3D 图像。如果人眼距屏的距离与投影仪距屏的距离相差比较大,部分焦线(靠近屏幕边缘)的反射光线不能进入人相应的眼睛,看到的图像就不完整。所以本文是在人眼距屏的距离与投影仪距屏的距离相等的情况下做的研究。

当增多投影仪台数,并且使相邻两台投影仪投影的图像分别为人的左右眼的图像,就可以实

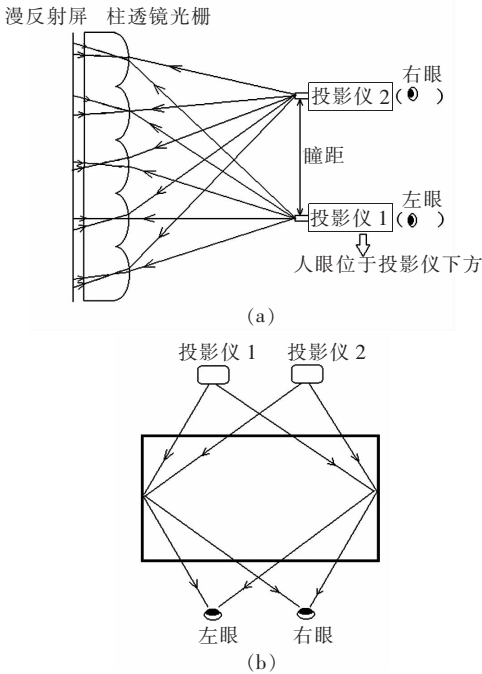


图 2 柱透镜光栅投影式 3D 显示原理。(a) 投影式 3D 显示系统俯视图;(b) 投影式 3D 显示系统平视图。

Fig. 2 Display theory of projection autostereoscopic based on cylindrical lens grating. (a) Plan view of projection autostereoscopic display system; (b) Flat view of projection autostereoscopic display system.

现多视点的不同立体图像的显示。

2.2 单个投影仪的视区研究

2.2.1 单个投影仪的主次视区距离的确定

如图 3 所示,投影仪发出的光经过该定向反射屏的透镜单元 m_1 会汇聚在漫反射屏上,经过漫反射屏反射之后,部分光经过同个透镜单元 m_1 ,会在该投影仪位置的竖直方向汇聚成一条亮条纹,为主视区。还有部分光经过透镜单元 m_2 、 m_3 在主视区以外一定距离汇聚成次视区。

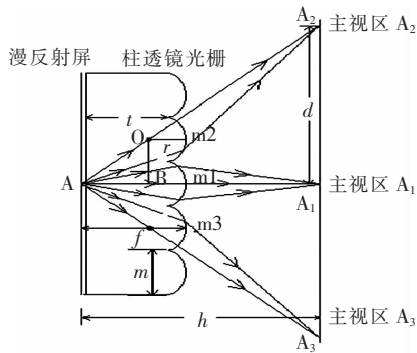


图 3 次视区的形成示意图

Fig. 3 Schematic configuration of the formation of secondary view port

设透镜圆弧的曲率中心为 O ,曲率半径为 r ,透镜焦距为 f ,光栅栅距为 m ,观看位置到漫反射屏的距离为 h ,主视区与次视区距离为 d ,由相似三角形的关系可知:

$$\triangle AA_2A_1 \cong \triangle AOB, \text{ 可得 } \frac{d}{m} = \frac{h}{f-r}, \text{ 有}$$

$$d = \frac{mh}{f-r} \quad (1)$$

另外,设 $x = \frac{1}{2}m$,透镜折射率为 n ,漫反射屏与柱透镜光栅之间为与柱透镜光栅材料相同的基板(为方便将柱透镜光栅贴合到漫反射屏上而设),则基板厚度 t 为

$$t = \frac{\sqrt{(r^2 - x^2)(r^2 n^2 - x^2)} + x^2}{\sqrt{r^2 n^2 - x^2} - \sqrt{r^2 - x^2}} \quad (2)$$

$$f = t + r - \sqrt{r^2 - x^2} = \frac{r^2}{\sqrt{r^2 n^2 - x^2} - \sqrt{r^2 - x^2}} + r \quad (3)$$

那么,在仅知道栅距 m ,曲率半径 r 和折射率 n 的情况下,就能确定基板厚度 t 和焦距 f ,进而求出主次视区距离 d 。

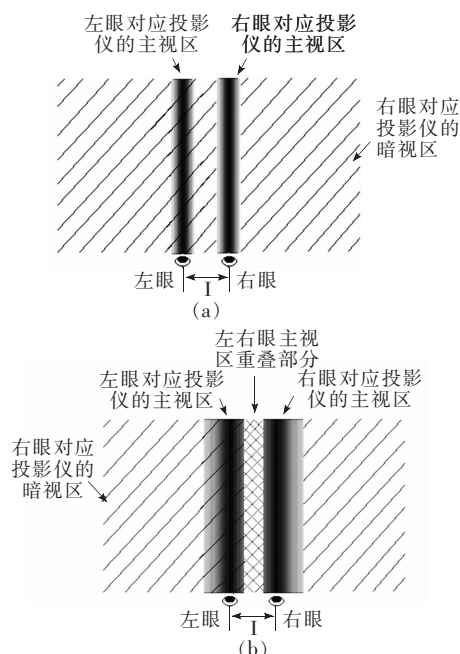


图 6 串扰来源示意图。(a)主视区宽度小于人眼瞳孔距离;(b)主视区宽度大于人眼瞳孔距离。

Fig. 6 Schematic configuration of the origin of crosstalk. (a) Width of the primary view port is less than papillary distance; (b) Width of the primary view port is greater than papillary distance.

仪主视区的左边缘。 $E_1(x)$ 为不包括串扰的整个视区光照度分布函数, $E_2(x)$ 为串扰在整个视区的光照度分布函数。

设 S 为人眼瞳孔面积,定义串扰 $K = \frac{\text{人眼接收到的其他投影仪的光通量}}{\text{人眼接收到的总光通量}}$ 。则有:

$$K = \frac{E_2(x) \cdot S}{E_1(x) \cdot S + E_2(x) \cdot S} = \frac{E_2(x)}{E_1(x) + E_2(x)} \quad (9)$$

对于主视区宽度 $0 < d \leq I$ 以及 $I < d \leq 2I$ 的串扰分布可参考图 7(a)、(b)中的下图。图 7 中各参量的意义: $E_{\max}$ 为主视区水平方向最中间位置的光照度, $E_{\min}$ 为次要视区之间的暗视区的平均光照度, N 为视点个数, E_c 为重叠视区水平方向最中间位置的光照度, $E_b = (N-1)E_{\min} + E_c$ 。

从图 7 可知:

(1)当主视区宽度小于人眼瞳孔距离时,串扰比较大的区域主要在主视区边缘以及暗视区,此时串扰只有杂散光串扰,且串扰最大值出现在暗视区;

(2)当主视区宽度大于人眼瞳孔距离时,串扰

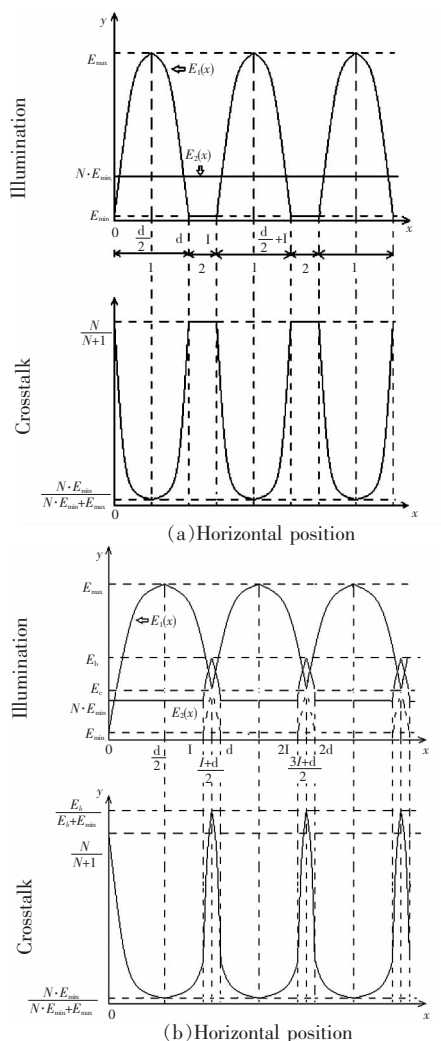


图 7 $0 < d \leq I$ 和 $I < d \leq 2I$ 时的光照度分布和串扰分布示意图。(a) $0 < d \leq I$; (b) $I < d \leq 2I$; 1:主视区; 2:暗视区。

Fig. 7 Schematic configuration of the distribution of illumination and crosstalk. (a) $0 < d \leq I$; (b) $I < d \leq 2I$; 1:Primary view port; 2: Dim view port.

比较大的区域主要在主视区重叠的区域,此时串扰包括了杂散光串扰和主视区重叠串扰,主视区宽度越大,整体串扰越大;

(3)当主视区宽度大于人眼瞳孔距离的两倍时,各个投影仪的主视区没有不重叠的部分,主视区重叠串扰成为主要串扰,能够满足人眼观看需要、串扰较小的 3D 观看视区宽度很小。

3 TracePro 仿真实验验证及结果分析

3.1 单个投影仪主次视区距离计算公式的仿真验证

当 $m = 1.392 \text{ mm}$, 曲率半径 $r = 2 \text{ mm}$,

$h=2\,501\text{ mm}$, 改变柱透镜光栅折射率, 使焦距 f 变化, 根据公式 (1), 以及参考文献^[5] 中的公式 $d=\frac{hm}{f}$, d 与 f 的理论数据关系和 TracePro 仿真数据关系如图 8 所示。

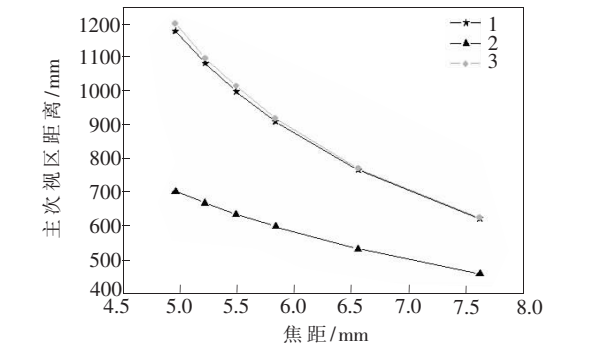


图 8 焦距与主次视区距离的关系。1: 本文公式计算结果; 2: 参考文献^[5] 公式计算结果; 3: TracePro 仿真结果。

Fig. 8 Relationship of focal length and the distance between primary view port and secondary view port. 1: Computed results based on the formula of this paper; 2: Computed results based on the formula of the reference^[5]; 3: Emulational results based on TracePro.

从图中可知, 参考文献的计算结果与 TracePro 仿真结果相差很大, 而本文的主次视区计算公式与 TracePro 仿真结果基本相符, 本文公式较参考文献公式更准确。

3.2 单个投影仪主视区宽度计算公式的仿真验证

图 9 为柱透镜光栅折射率 $n=1.55$, 投影距

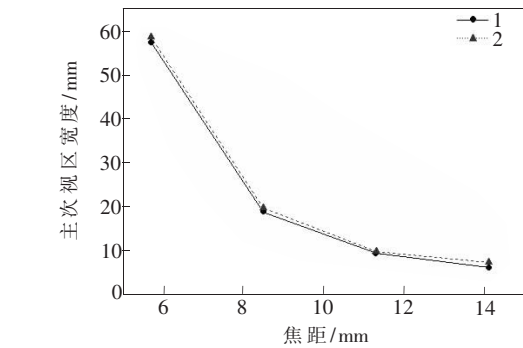


图 9 焦距与主视区宽度的关系。1: 公式计算结果; 2: TracePro 仿真结果。

Fig. 9 Relationship between the focal length and the width of the primary view port. 1: Computed results based on the formula; 2: Emulational results based on TracePro.

离 $h=2\,501\text{ mm}$, 改变柱透镜圆弧的宽高比情况下, 焦距与主视区宽度关系的理论计算结果与仿真结果的对比。

从图 9 可知, 理论计算结果和仿真结果基本相符, 主视区宽度计算公式是比较准确的。

3.3 多投影仪多视点的 TracePro 仿真图

图 10 给出了一种柱透镜光栅实现 9 台投影仪 8 个视点的 TracePro 仿真图, 每台投影仪的距离为人眼瞳孔距离。 x 为水平方向, y 为垂直方向。

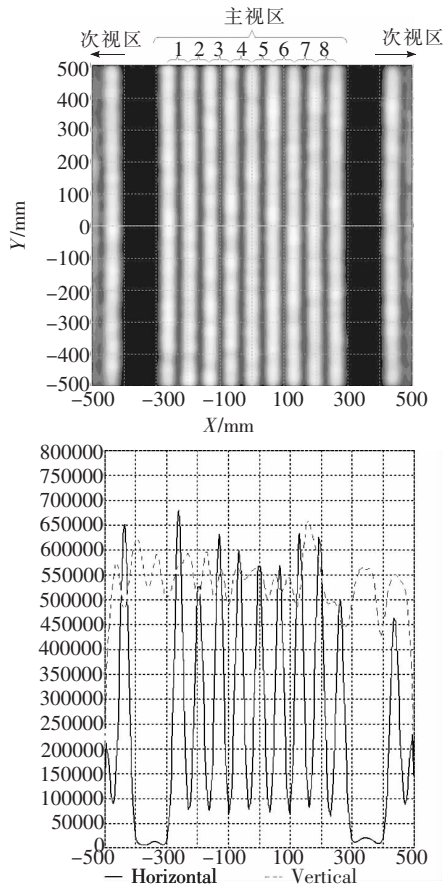


图 10 9 台投影仪 8 个视点的 TracePro 仿真图。1~8: 3D 观看视点 1~8。

Fig. 10 Emulational picture of that 9 projectors come out 8 view ports. 1~8: 3D view port 1~8.

图中主视区内的每条亮条纹对应于一台投影仪的投影图像经过定向反射屏后在理想观看平面形成的光照度, 也就是每条亮条纹对应于一台投影仪的观看视区。相邻两亮条纹中心的距离为 65 mm , 与相邻投影仪的距离相等。

3.4 实际参数举例分析

表 1 给出了几组柱透镜光栅栅距为 1.392 mm , 曲率半径为 2 mm , 折射率不同的情况下, 投影 3D

显示的视点及串扰情况;表 2 给出了光栅栅距 2 mm,折射率 1.55,柱透镜单元曲率半径不同的情况下,投影 3D 显示的视点及串扰情况。表中结果均为 TracePro 仿真所得结果计算得到。

表 1 不同折射率下的 3D 观看视点及串扰

Table 1 3D view ports and crosstalk under different refractive index

折射率	单个投影仪的主 次视区距离/mm	可设置的投 影仪个数	可实现的 3D 视点个数	单个投影仪的主 视区宽度/mm	串扰最小值/ %	串扰最大值/ %	串扰小于 10% 的各个 3D 视点 的宽度/mm
1.34	620.47	10	9	15.65	2.5	90.00	13.45
1.42	764.50	12	11	18.40	3.5	91.67	14.70
1.50	908.03	14	13	21.54	4.2	92.86	16.32
1.55	997.25	16	15	22.01	4.5	93.75	16.25
1.60	1 080.51	17	16	18.03	5.0	94.12	12.74
1.65	1 175.75	19	18	22.93	5.5	94.74	15.47

表 2 不同曲率半径下的 3D 观看视点及串扰

Table 2 3D view ports and crosstalk under different radius of curvature

曲率半 径/mm	单个投影仪的主 次视区距离/mm	可设置的观 影仪个数	可实现的 3D 视点个数	单个投影仪的主 视区宽度/mm	串扰最小值/ %	串扰最大值/ %	串扰小于 10% 的各个 3D 视点 的宽度/mm
1.000	3 165.82	49	48	278.13	67.5	72.60	0
1.450	2 184.28	34	33	143.55	36.5	50.00	0
2.125	1 399.34	22	21	58.32	6.0	95.45	37.50
3.083 3	924.27	15	14	19.63	4.5	93.33	14.50
4.062 5	690.86	11	10	9.79	1.8	90.91	8.79
5.05	551.81	9	8	7.29	3.2	88.89	5.96

从表 1 及表 2 结果可知:

(1)不同的设计参数,如改变光栅折射率和光栅曲率半径,可设置的投影仪个数、可实现的 3D 视点个数、单个投影仪的主视区宽度、串扰大小、串扰小于 10%的各个 3D 视点宽度均将改变。

(2)单个投影仪主视区宽度过小时,串扰小于 10%的各个 3D 视点宽度很小;单个投影仪主视区宽度大于人眼瞳孔距离两倍以上时,串扰小于 10%的 3D 视点不存在;单个投影仪主视区宽度接近人眼瞳孔距离时,串扰小于 10%的 3D 视点宽度最宽。如表 2 给出的光栅栅距 2 mm,折射率 1.55,曲率半径 2.125 mm 的设计参数,单个投影仪主视区宽度为 58.32 mm,最接近人眼瞳孔距离,此时串扰小于 10%的各个 3D 视点宽度均达到了 37.5 mm,优于其他设计参数。

4 结 论

本文研究的基于柱透镜光栅的投影式 3D

显示系统是由多台投影仪及定向反射屏组成,定向反射屏包括了柱透镜光栅和位于柱透镜光栅焦平面的漫反射屏。在前人研究的基础上,对主次视区距离的计算公式做了一定的改善,使理论计算结果与仿真实验结果符合得更好。另外得出了主视区宽度的计算公式,该公式的理论计算结果与仿真实验结果也相符合。其中确定主次视区的距离是确定柱透镜光栅投影 3D 可设置的投影仪个数和视点个数的前提,确定主视区宽度,保证主视区宽度尽可能等于人眼瞳孔距离,是实现较小串扰、较宽的 3D 观看视区的前提。利用这两个公式,可以根据需要合理设计系统的参数。文中列举了多组设计参数,其中当光栅栅距为 2 mm,折射率为 1.55,柱透镜单元曲率半径为 2.125 mm 时,理论上至少可实现 21 个 3D 观看视点,且每个视点串扰小于 10%的宽度达到 37.5 mm。

参 考 文 献：

[1] 王爱红,王琼华,李大海. 立体显示中立体深度与视差图获取的关系 [J]. 光学 精密工程,2009, 17(2):433-437.
[2] 丁剑飞,刘永进. 三维立体显示技术综述 [J]. 系统仿真学报,2008, 20(S1):132-135.
[3] 王琼华,王爱红. 三维立体显示综述 [J]. 计算机应用,2010, 30(3): 579-581.
[4] Wang Q H, Tao Y H, Li D H, *et al.* 3D Autostereoscopic liquid crystal display based on lenticular lens [J]. *Chin. J. Electron Devices*,2008, 31(1):296-298.
[5] Wang A H, Wang Q H, Li D H, *et al.* Three dimensional display technology [J]. *Chinese Journal Of Electron Devices*,2008, 31(1): 299-301.
[6] 王爱红,王琼华. 光栅式自由立体显示器概述 [J]. 现代显示,2009, 20(10):12-17.
[7] 谷俊,陶宇虹,王琼华,等. 基于双狭缝光栅的裸眼三维立体投影机 [J]. 激光与光电子学进展,2009,30(8):31-33.
[8] 王恒,朱秋东. 反射式多路投影立体显示系统的研究[J]. 光学技术,2008,34(2):178-180.
[9] 毛崇德,王元庆. 多视点自由立体投影系统 [J]. 光电工程,2006,33(4):59-62.



《中国光学》征稿启事

《中国光学》，双月刊，A4 开本；刊号：ISSN 2095-1531/CN22-1400/O4；国内外公开发行，邮发代号：国内 12-140，国外 BM6782。

- | | |
|------------------|-----------------------------|
| ★中国科技核心期刊 | ★荷兰 Scopus 数据库源期刊 |
| ★中国光学学会会刊 | ★美国《化学文摘》(CA)源期刊 |
| ★中国学术期刊(光盘版)源期刊 | ★美国乌利希国际期刊指南(Ulrich LPD)源期刊 |
| ★万方数字化期刊全文数据库源期刊 | ★俄罗斯《文摘杂志》(AJ)源期刊 |
| ★中国科技期刊数据库源期刊 | ★波兰《哥白尼索引》(IC)源期刊 |

报道内容：基础光学、发光理论与发光技术、光谱学与光谱技术、激光与激光技术、集成光学与器件、纤维光学与器件、光通信、薄膜光学与技术、光电子技术与器件、信息光学、新型光学材料、光学工艺、现代光学仪器与光学测试、光学在其他领域的应用等。

发稿类型：学术价值显著、实验数据完整的原创性论文；研究前景广阔，具有实用、推广价值的技术报告；有创新意识，能够反映当前先进水平的阶段性研究简报；对当前学科领域的研究热点和前沿问题的专题报告；以及综合评述国内外光学技术研究现状、发展动态和未来发展趋势的综述性论文。

欢迎投稿、荐稿，洽谈合作。

主管单位：中国科学院

主办单位：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

编辑出版：《中国光学》编辑部

投稿网址：<http://www.chineseoptics.net.cn>

邮件地址：chineseoptics@ciomp.ac.cn, zgghx@126.com

联系电话：(0431)86176852；(0431)84627061 **传 真：**(0431)84613409

编辑部地址：长春市东南湖大路 3888 号(130033)

《中国光学》编辑部