

## 液晶显示中莫尔条纹仿真模拟

郭程祥<sup>1</sup>, 张钦泉<sup>2</sup>, 吉佳瑞<sup>1</sup>, 杨磊<sup>1\*</sup>, 谢洪波<sup>1</sup><sup>1</sup>天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;<sup>2</sup>海信视像科技股份有限公司, 山东 青岛 266000

**摘要** 在液晶电视显示模组中, 多层背光膜片与像素面板均存在周期性结构, 组合使用时会产生明显的莫尔条纹, 这会严重影响显示效果。建立液晶显示(LCD)模组中莫尔条纹的理论模型, 并进行仿真分析, 以探寻减弱或消除莫尔条纹的方法具有重要的工程意义。基于Zemax建立双层棱状膜片莫尔条纹模型, 并加入眼睛观测模型, 以模拟人眼对LCD屏幕中莫尔条纹的观测效果。然后, 在MATLAB中构建背光膜片与像素面板的理论模型, 通过改变背光膜片和面板的周期尺寸、偏转角度等参数, 模拟计算出莫尔条纹的尺寸和角度等参数, 并综合考虑人眼观测确定莫尔条纹在显示中的影响。

**关键词** 计量; 莫尔条纹; 液晶显示模组; 棱状膜片; Zemax模拟; MATLAB仿真

中图分类号 TN27

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2012004

## Moire Fringes Simulation in Liquid Crystal Display

Guo Chengxiang<sup>1</sup>, Zhang Qinquan<sup>2</sup>, Ji Jiarui<sup>1</sup>, Yang Lei<sup>1\*</sup>, Xie Hongbo<sup>1</sup><sup>1</sup>Key Laboratory of the Ministry of Education on Optoelectronic Information Technology, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;<sup>2</sup>Hisense Visual Technology Corporation Limited, Qingdao 266000, Shandong, China

**Abstract** In the liquid crystal television display module, the multilayer backlight diaphragm and pixel panel both have periodic structures, and their use in combinations often results in obvious moire fringes, which seriously affects the actual visual effect. Therefore, it is important to establish a theoretical model of moire fringes in the liquid crystal display (LCD) module and carry out simulation analysis to explore methods for decreasing or eliminating moire fringes. Here, a moire fringe model with bilayer prismatic diaphragm based on Zemax is established, and it is combined with an eye observation model to simulate the visual effect of human eyes on the moire fringes in the LCD screen. In addition, the theoretical models of the backlight diaphragm and pixel panel are constructed in MATLAB. By changing parameters including the cycle size and rotation angle of the backlight diaphragm and the pixel panel, the parameters including the size and angle of the moire fringe are simulated and analyzed, and the effect of moire fringes determined by the human eye observation on the display is considered comprehensively.

**Key words** metrology; moire fringes; liquid crystal display module; prismatic diaphragm; Zemax simulation; MATLAB simulation

## 1 引言

18世纪, 法国人莫尔首先发现了莫尔条纹这一光学现象, 即两个具有恒定频率或周期的图像以一定的角度叠加在一起时会干涉产生亮暗相间的条纹现象<sup>[1-2]</sup>。莫尔条纹犹如一把双刃剑, 一方面有广泛的应用价值, 可应用于计量测试领域<sup>[3]</sup>、防伪领域<sup>[4]</sup>、光学校准和美术学上营造特别的视觉效果等。另一方面, 莫尔条纹的出现会造成许多困扰, 例如: 当使用数码相机

或者手机拍摄带有细小周期性的物体时会产生大面积彩色和不规则的条纹; 液晶电视屏幕中的多层周期性结构膜片叠加在一起时会显示出彩色和不规律的莫尔条纹<sup>[5]</sup>。

目前对于显示莫尔条纹的研究, 多集中在立体视觉显示领域<sup>[6]</sup>。例如, 中山大学研究团队对由光栅和菲涅耳透镜组成的层状光学结构所引起的彩色莫尔图案的视觉效果进行了研究, 表明折射光学元件产生的莫尔条纹效应不仅与光栅的空间结构有关, 还与视角

收稿日期: 2022-02-25; 修回日期: 2022-04-19; 录用日期: 2022-05-03

通信作者: \*yanglei@tju.edu.cn

有关<sup>[7]</sup>。对于消除立体三维显示器产生的莫尔条纹效应,Chen等<sup>[8]</sup>采用几何射线跟踪和亮度分布堆栈方法设计出的光学扩散器可以显著降低莫尔条纹对显示质量的影响。此外,Zhou等<sup>[9]</sup>通过优化彩色滤光片RGB像素排列顺序,达到降低莫尔条纹对比度的效果。为了解决显示设备设计过程中莫尔条纹现象观测记录难的问题,Kim等<sup>[10-11]</sup>采用数值模拟的方式建立了彩色莫尔条纹的预测模型。

在以上介绍的模型建立方法中,对显示莫尔条纹的仿真多采用简化光栅的计算方式,将莫尔条纹生成元件如膜片、显示像素面板简化成一维或者二维光栅结构,便于模型的建立和计算。简化后的模型与实际情况存在较大误差,为进一步贴合实际中产生的莫尔条纹现象,本工作基于莫尔条纹产生的原理,研究液晶电视显示模组中具有周期性规律结构的多层背光膜片和面板组合使用时,不同参数对莫尔条纹显示效果造成的影响。

首先,本文在光学设计软件Zemax中建立模型以研究莫尔条纹形成的基本规律,并在光路中添加设计的特定透镜组模型以模拟人眼观测效果。然后,利用MATLAB软件进行背光膜片与像素面板的建模仿真模拟,通过改变相关参数,仿真出不同参数特征

的莫尔条纹现象。最后,在仿真模型中加入人眼结构,利用相关点扩散函数对仿真出的莫尔条纹进行处理,模拟出实际的观测效果。本文建立的莫尔条纹仿真模型可对液晶显示中的莫尔条纹现象进行预测和评估。

## 2 原理分析

### 2.1 液晶模组结构

传统液晶电视显示模组主要包括发光二极管(LED)灯条、导光板(扩散板)、膜材和像素面板等结构。膜材又分为白色反光片、扩散片、棱镜膜和增亮膜<sup>[12]</sup>:白色反光片的主要材料为聚酯薄膜(PET),作用是将导光板散射点扩散的光向上反射;扩散片的作用是使得光扩散,以提高背光的均匀性;增亮膜利用多层材料的消偏振作用对光进行循环利用,极大地增加了亮度;棱镜膜的作用是让分散的光线集中在法线附近70°范围内出射,超出特定角度的光会被反射再利用<sup>[13]</sup>。棱镜膜的结构如图1所示,其特殊的周期性棱状结构会导致其与像素面板的搭配过程中产生莫尔条纹,而棱镜膜往往采用双层结构,这会进一步加重莫尔条纹的影响。本研究主要是围绕双层膜片搭配使用时会产生莫尔条纹现象展开的。

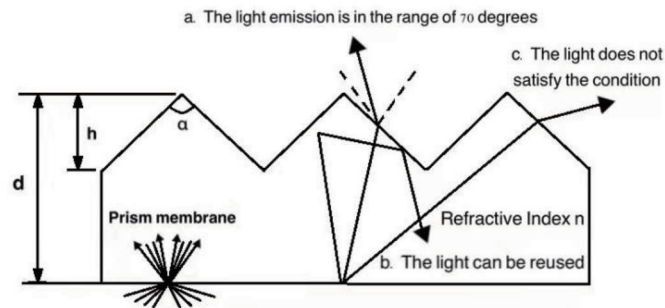


图1 棱镜膜结构示意图<sup>[13]</sup>

Fig. 1 Structural diagram of prism diaphragm<sup>[13]</sup>

### 2.2 莫尔条纹理论基础

关于莫尔条纹的形成理论主要有三种:1)几何光学遮光阴影原理,即将条纹交点构成的轨迹看作莫尔条纹的强度分布<sup>[14]</sup>;2)物理光学衍射干涉原理,即莫尔条纹构成的新的光强度分布可以由衍射波之间的相互干涉作用来描述;3)频谱分析原理<sup>[15]</sup>,即莫尔条纹可以放在频域中解释,由不同的空间频率分量组成。

由于膜片面板的棱宽尺寸为几十微米,故主要采用几何遮光阴影原理和频谱分析原理。利用几何方法简化计算简单光栅莫尔条纹的参数,周期 $D$ 可表示为

$$D = \frac{ab}{\sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos \theta}}, \quad (1)$$

式中: $a$ 为光栅1的栅距; $b$ 为光栅2的栅距; $\theta$ 为两光栅之间的偏转夹角。在光栅栅距确定的情况下,偏转夹角 $\theta$ 为莫尔条纹主要影响因素。

光栅之间的相互作用可以用光栅的透过率函数之间的乘法来描述。一个余弦光栅的透过率函数可以表示为

$$t = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(k \cdot x), \quad (2)$$

式中: $k$ 为光栅的波数; $x$ 为横坐标。因此,两个光栅之间的相互作用可以表示为

$$t_{12} = t_1 \times t_2 = \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(k_1 \cdot x) \right] \times \left[ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(k_2 \cdot x) \right] = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \cos(k_1 \cdot x) + \cos(k_2 \cdot x) + \frac{1}{2} \cos[(k_1 + k_2) \cdot x] + \frac{1}{2} \cos[(k_1 - k_2) \cdot x] \right\}, \quad (3)$$

式中:  $k_1$  和  $k_2$  分别为光栅 1 和光栅 2 的波数;  $t_1$  和  $t_2$  分别为光栅 1 和光栅 2 的透过率函数。在式 (3) 中, 第一项为常数项, 第二项和第三项为光栅本身相关的函数项, 第四项和第五项为两光栅相互作用产生的空间频率项, 可见的莫尔条纹为波数最小(空间频率最低)的第五项。

莫尔条纹对液晶电视屏幕观测效果的影响在物理过程中的体现是屏幕上莫尔条纹经过人眼成像至人的视网膜处, 最终由大脑反应出的结果。莫尔条纹经过人眼成像后会出现一定的变化, 人眼的分辨能力也是有限的, 无法分辨过高频率的物体。人眼相当于一个低通滤波器, 通过建立人眼模型, 从不同观测角度和不同接收频率下分析莫尔条纹现象, 如图 2 所示。其中,  $\theta_1$  和  $\theta_2$  为水平方向不同的观测角度。

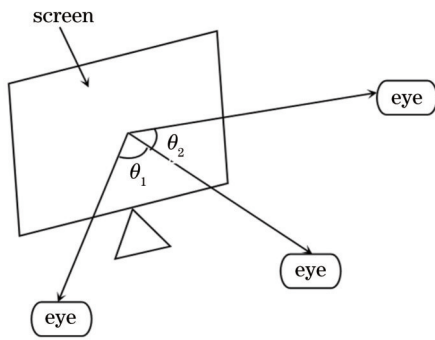


图 2 人眼位于不同观测角度的示意图  
Fig. 2 Diagram of human eyes at different viewing angles

采用人眼模型对莫尔条纹进行处理, 将所建立的人眼模型的点扩散函数与莫尔条纹物函数进行卷积处理, 得到条纹像函数。计算原理为

$$g(x) = f(x) * h(x), \quad (4)$$

式中:  $f(x)$  为莫尔条纹物函数;  $*$  为卷积运算符号;  $h(x)$  为人眼模型点扩散函数;  $g(x)$  为像面上得到的像函数。图 3 为人眼成像的傅里叶变换模型。

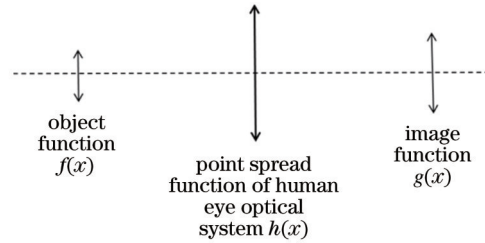


图 3 人眼成像的傅里叶变换模型  
Fig. 3 Fourier transform model of human eye imaging

### 3 模型建立与仿真分析

#### 3.1 模型设计

液晶显示模组产生莫尔条纹进而影响观看效果分为两个过程: 多层膜片和面板搭配使用产生莫尔条纹; 莫尔条纹进入人眼产生视觉效果的过程。在模型的建立与仿真分析的过程中, 分别建立两个过程并综合分析。为方便建立完整过程, 在现有的光学设计仿真软件 Zemax 中建立双层膜片和透镜成像模型, 可以比较直观地看到改变不同参数对莫尔条纹的周期和角度的影响。经过原理分析可知, 可从膜片本身参数的改变、探测器接收位置的改变和探测器接收角度的改变对整个过程的进行仿真。此外, 基于对多层膜片叠加产生莫尔条纹的特性研究, 可以在 MATLAB 中建立数字仿真模型, 同样分为莫尔条纹的生成和人眼观看两个过程。改变参数输入计算出莫尔条纹的特征参数, 并输出直观的图像形式, 达到莫尔条纹的预测效果, 为液晶模组的设计工作提供帮助。图 4 为模型计划框图。

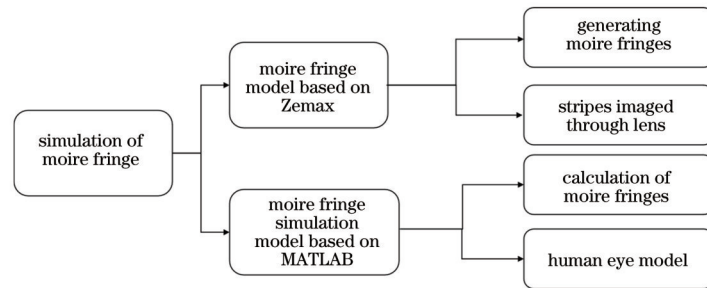


图 4 模型计划框图  
Fig. 4 Plan block diagram of model

#### 3.2 基于 Zemax 的莫尔条纹模型

为探究液晶电视双层棱状膜片莫尔条纹形成机理和条纹特征的影响因素, 在光学设计软件 Zemax 中建立双膜片莫尔条纹模型进行光路模拟。先通过机械设计软件构造出相应的棱状膜片结构, 再将其导入到 Zemax 中进行光路搭建。在 Zemax 构建光路时, 使用非序列模式。将构建好的棱状膜片结构导入到 Zemax 中, 构建出包含点光源阵列、双层棱状膜片和探测器的完整光路结构。控制点光源的发光锥角为  $90^\circ$ , 两棱状

膜片所在平面与光线方向垂直, 且两膜片之间有一定的偏转角, 加入一个透镜来模拟人眼对形成的莫尔条纹的观测效果, 最终在探测器上接收到直接形成的莫尔条纹图案和经过透镜成像后的莫尔条纹图案。图 5 所示膜片为棱镜膜, 整体的长宽均为 50 mm, 厚度为 0.25 mm。对于棱的部分, 棱高为  $35 \mu\text{m}$ , 棱周期为  $70 \mu\text{m}$ 。

在图 6(a) 所示的光路中, 从左到右依次是点光源阵列、具有一定旋转夹角的双层膜片和不同角度的探



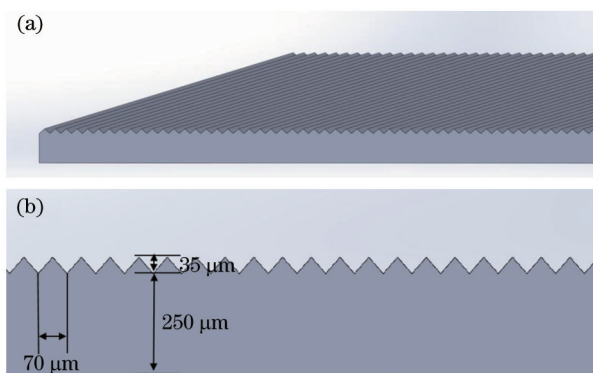


图 5 SolidWorks 建立的棱状膜片模型。(a)膜片图;(b)截面图

Fig. 5 Prism diaphragm model build by SolidWorks.

(a) Diaphragm figure; (b) sectional view

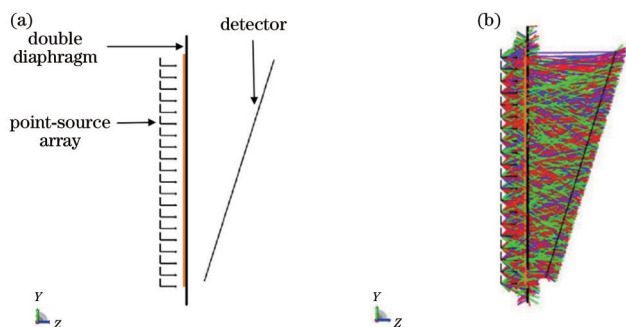


图 6 莫尔条纹模拟光路。(a)光路结构;(b)光线追迹图

Fig. 6 Simulated light path of moire fringes. (a) Light path structure; (b) ray tracing diagram

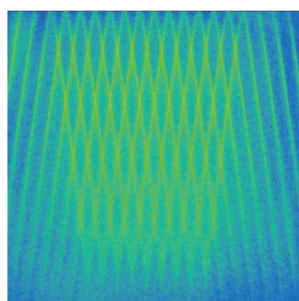


图 7 探测器接收效果图

Fig. 7 Reception of detector

测器。点光源采用大小为  $20 \times 20$  的阵列,间隔为  $2.5 \text{ mm}$ ,发光锥角为  $90^\circ$ 。两层膜片采用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)材料,并具有一定的偏转角。探测器为矩形探测器,且位于膜片后一定距离处。

由图 7 可以看出,位于膜片后方一定距离处的探测器可以接收到两方向条纹交叉形成的横向莫尔条纹。通过改变观测视角、观测距离、两膜片旋转夹角和两膜片倾斜夹角等因素,研究莫尔条纹的变化情况。

### 1) 观测视角的影响

采用大小为  $20 \times 20$  的点光源阵列,膜片旋转夹角为  $10^\circ$ ,探测器位于膜片后  $11.5 \text{ mm}$  处。经模拟发现,当探测器绕  $x$  轴旋转时,即观察视角不同时,探测器显示的莫尔条纹会出现角度和周期的变化,如图 8 所示。

从图 8 中可以直观地看到两层膜片干涉产生的横向莫尔条纹。在垂直于膜片棱的方向转动视角,随着视角的增大,横向莫尔纹的频率变得越来越高。

### 2) 观测距离的影响

此对比方案下,均采用大小为  $20 \times 20$  的点光源阵列,膜片旋转夹角为  $10^\circ$ ,探测器绕  $x$  轴旋转  $10^\circ$ ,改变探测器与膜片的距离。如图 9 所示,选取距离分别为  $5.5, 11.5, 16.5, 26.5 \text{ mm}$  时的探测器接收结果。可以看出,随着探测器距离膜片越来越远,产生的莫尔条纹区域逐渐变小,且逐渐模糊,只能在特定的一段距离范围内接收到莫尔条纹。

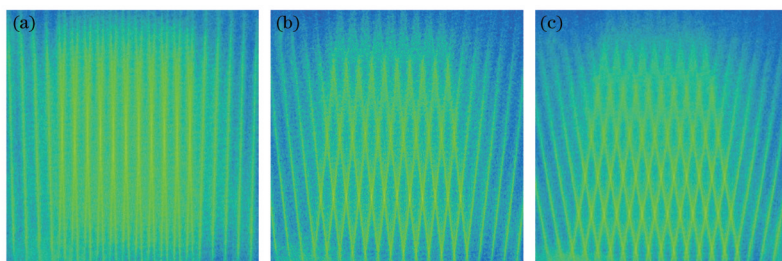


图 8 不同视角的模拟结果。(a)  $2.5^\circ$ ; (b)  $10.0^\circ$ ; (c)  $17.5^\circ$

Fig. 8 Simulation results from different views. (a)  $2.5^\circ$ ; (b)  $10.0^\circ$ ; (c)  $17.5^\circ$

### 3) 膜片旋转角的影响

此对比方案下,均采用大小为  $100 \times 100$  的点光源阵列,探测器绕  $x$  轴旋转  $18^\circ$ ,探测器与膜片的距离为

$20 \text{ mm}$ ,并改变膜片旋转夹角。选取  $2^\circ, 5^\circ, 8^\circ, 12^\circ$  旋转角时的探测器接收结果,如图 10 所示,可以观察到  $5^\circ$  和  $8^\circ$  旋转角时的莫尔条纹现象较为明显,  $2^\circ$  和  $12^\circ$  旋转

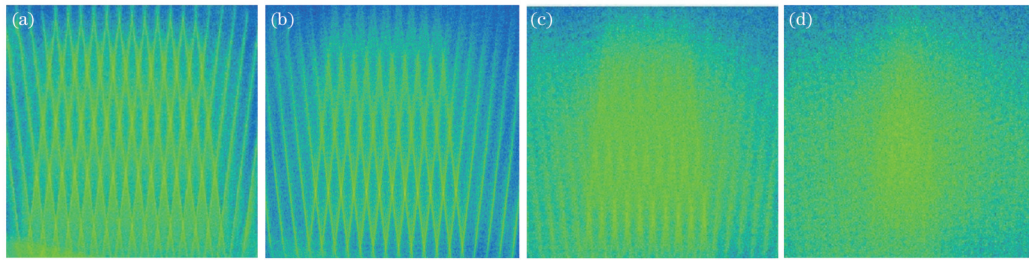


图 9 不同探测器距离下的模拟结果。(a) 5.5 mm; (b) 11.5 mm; (c) 16.5 mm; (d) 26.5 mm

Fig. 9 Simulation results under different detector distances. (a) 5.5 mm; (b) 11.5 mm; (c) 16.5 mm; (d) 26.5 mm

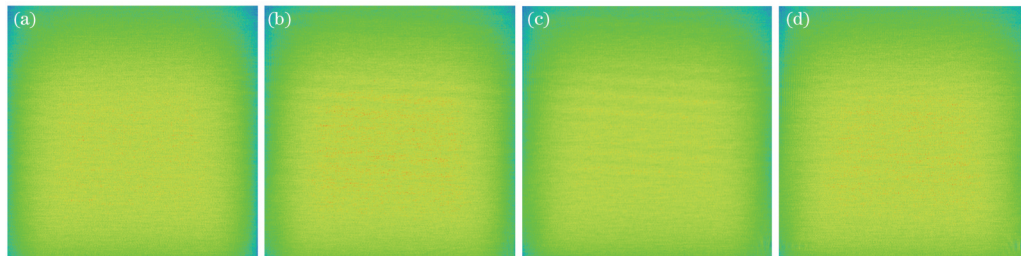


图 10 不同旋转角下的模拟结果。(a) 2°; (b) 5°; (c) 8°; (d) 12°

Fig. 10 Simulation results under different rotation angles. (a) 2°; (b) 5°; (c) 8°; (d) 12°

角时的莫尔条纹现象较为微弱。在其他条件确定的情况下,两膜片夹角在特定小角度范围内变化时会产生明显的莫尔条纹现象。

#### 4) 经透镜成像的影响

加入近轴透镜,将膜片后一定距离处的莫尔条纹图案成像到像面位置处,模拟人眼观测的效果,证明可以通过人眼在远处观察到莫尔条纹图案。莫尔条纹透镜成像模拟光路如图 11 所示。

图 11(a)所示结构中从左至右依次是大小为  $20 \times 20$  的点光源阵列,大小为  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  的双层膜片,膜片旋转夹角为  $10^\circ$ 、焦距为  $20 \text{ mm}$  的近轴透镜(绕

$x$  轴旋转  $10^\circ$ )和矩形探测器(绕  $x$  轴旋转  $10^\circ$ )。根据近轴透镜焦距用高斯成像公式计算,在物距为  $40 \text{ mm}$  和像距为  $40 \text{ mm}$  的位置处放置近轴透镜和探测器,观察探测器接收到的莫尔条纹现象。

加入透镜前后探测器接收效果如图 12 所示。经过近轴透镜成像后,在探测器位置接收到的莫尔条纹图案出现了相应的变化,莫尔条纹图案经近轴透镜后成倒像,边缘视场照度变低,也存在分辨率降低导致的模糊。加入近轴透镜可以很好地模拟人眼观测的效果,通过改变近轴透镜的焦距和位置可以直观地模拟人眼在不同距离处观测和不同放大率下观测的效果。

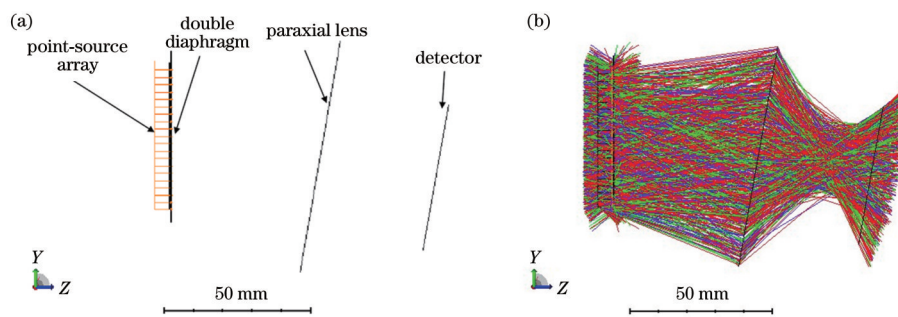


图 11 莫尔条纹透镜成像模拟光路。(a) 光路结构; (b) 光线追迹图

Fig. 11 Simulated optical path of moiré fringe imaging through lens. (a) Light path structure; (b) ray tracing diagram

### 3.3 莫尔条纹仿真模型及实验验证

#### 3.3.1 基于 MATLAB 的仿真计算模型

基于莫尔条纹的形成机理,即存在一定偏转夹角的两个周期性图案叠加会产生明暗相间的条纹。在 MATLAB 中构建莫尔条纹的模型,将其以图像化的形式表现出来,便于观察。

采用正弦函数模拟单层棱状结构的透过率分布,

并以不同的灰度值表示相应的透过率值,形成了灰度渐变的正弦光栅图案,并生成了偏转一定角度的正弦光栅图案。将两光栅同一位置的透过率值相乘得到叠加图案对应位置的透过率,进而生成叠加图案,即莫尔条纹。莫尔条纹生成过程图如图 13 所示。

基于 MATLAB 的莫尔条纹生成模型包含一层面板和多层棱状膜片结构,各层结构参数可调,可调参数



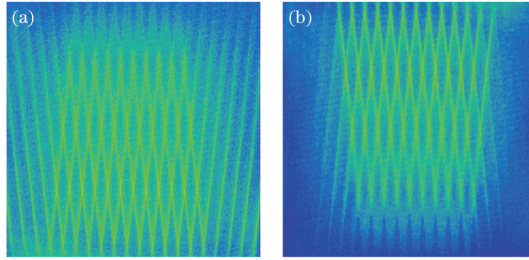


图 12 加入透镜前后探测器接收效果。(a)加透镜之前;(b)加透镜之后

Fig. 12 Reception of detector before and after adding lens. (a) Before adding lens; (b) after adding lens

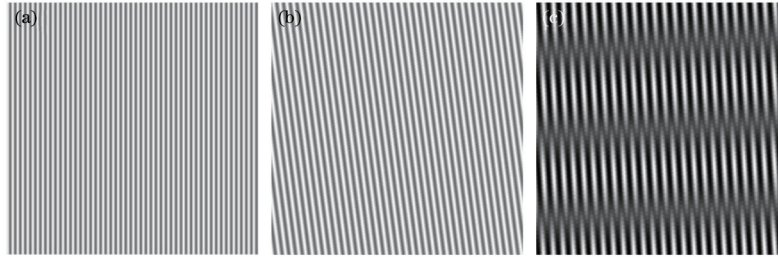


图 13 莫尔条纹生成过程图。(a)竖直条纹;(b)倾斜条纹;(c)莫尔条纹

Fig. 13 Process of producing moire fringes. (a) Vertical fringes; (b) slanted fringes; (c) moire fringes

包括面板像素尺寸、膜片棱宽、膜片对比度和各层结构偏转角。该模型计算中会对各个参数加入一定的误差范围,进而包含多范围的计算结果。模拟包含了在生产和安装过程中产生的多种误差,对于误差参数,其出现概率以正态分布的形式存在。因此,可以计算出不同参数下莫尔条纹的出现概率,并根据概率对莫尔条纹进行筛选,选择大概率结果作为主要参考对象。

### 3.3.2 膜片莫尔条纹的实验测试

选用两张 A4 大小的 DSP5/OCT 单层棱状膜片,膜片的棱周期为 50 μm。以不同旋转角度叠加,观察莫尔条纹现象,并对莫尔条纹周期进行测量,测量过程如图 14 所示。最终,计算出莫尔条纹周期对膜片棱周期的放大倍数。

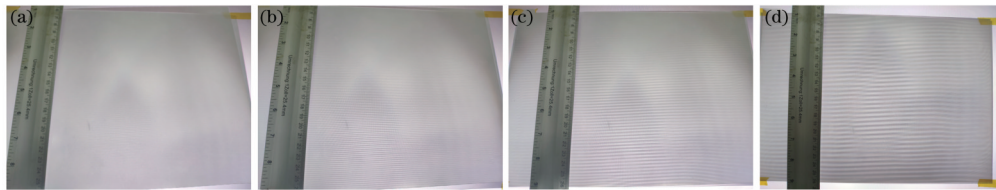


图 14 不同旋转角下膜片莫尔条纹的测量图。(a) 4.775°; (b) 2.596°; (c) 1.148°; (d) 0.547°

Fig. 14 Measurement diagram of moire fringes of diaphragm at different rotation angles. (a) 4.775°; (b) 2.596°; (c) 1.148°; (d) 0.547°

此外,在 MATLAB 模型中对此双膜片结构进行模拟,通过人工数像素点的方式获取生成的莫尔条纹图案的周期。莫尔条纹放大率的计算公式为

$$M = \frac{T_m}{T_d}, \quad (5)$$

式中:  $T_m$  为莫尔条纹周期;  $T_d$  为棱的周期。

实际双膜片莫尔条纹周期的测量数据和 MATLAB 仿真得出的莫尔条纹周期及其放大率分别在表 1 和表 2 中给出。

MATLAB 中设置的棱周期宽度为 7 mm。将测量结果与仿真结果进行对比,从图 15 中可以看出,程序模拟出来的莫尔条纹现象与实际情况较为吻合。

### 3.3.3 基于图像处理的莫尔条纹参数识别

本研究为能够快速便捷地实现对生成的莫尔条纹

的周期和角度的自动化获取,对生成的莫尔条纹图案进行图像处理,通过添加噪声、滤波、图像增强、二值化、求补和图像腐蚀等步骤去除背景条纹噪声。图 16 中展示了图像处理前后的莫尔条纹图案的对比结果。在此基础上提取条纹信息特征,并求取条纹周期与角度参数,求解原理如图 17 所示。

直线  $L_1$  和  $L_2$  的斜率 ( $K_1$  和  $K_2$ ) 为

$$K_1 = \frac{y_{11} - y_{12}}{x_{11} - x_{12}}, \quad (6)$$

$$K_2 = \frac{y_{21} - y_{22}}{x_{21} - x_{22}}, \quad (7)$$

式中:  $x_{11}$ 、 $x_{12}$ 、 $x_{21}$ 、 $x_{22}$ 、 $y_{11}$ 、 $y_{12}$ 、 $y_{21}$ 、 $y_{22}$  分别为点坐标值。

莫尔条纹的倾斜角度  $\theta_k$  和周期  $T$  的表达式为

表 1 双层 DSP5/OCT 棱镜膜片莫尔条纹的测量结果

Table 1 Measurement results of moire fringes of diaphragm in bilayer DSP5/OCT prism

Rotation angle / (°)	Moire fringe period /mm	Magnification
0.547	6.000	120.0
0.684	4.000	80.0
0.957	3.400	68.0
1.148	2.750	55.0
1.367	2.500	50.0
1.640	1.667	33.3
2.596	1.143	22.9
3.142	0.929	18.6
4.258	0.667	13.3
4.775	0.500	10.0

表 2 莫尔条纹仿真结果

Table 2 Simulation results of moire fringes

Rotation angle / (°)	Moire fringe period /mm	Magnification
0.547	733.011	104.7
0.684	585.014	83.5
0.957	418.019	59.7
1.148	350.036	50.0
1.367	294.043	42.0
1.640	245.051	35.0
2.596	155.052	22.2
3.142	128.062	18.3
4.258	95.084	13.6
4.775	84.054	12.0

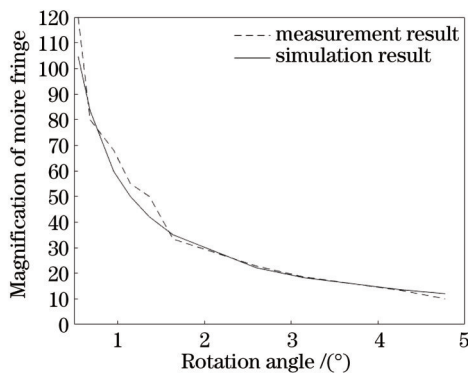


图 15 双膜片莫尔条纹测量结果与仿真结果比较

Fig. 15 Comparison between measurement result and simulation result of moire fringe in double diaphragm

$$\theta_K = \frac{\arctan K_1 + \arctan K_2}{2}, \quad (8)$$

$$T = \frac{|-K_1 \cdot x_{11} + y_{11} + K_2 \cdot x_{21} - y_{21}|}{n \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{4}(K_1 + K_2)^2}}, \quad (9)$$

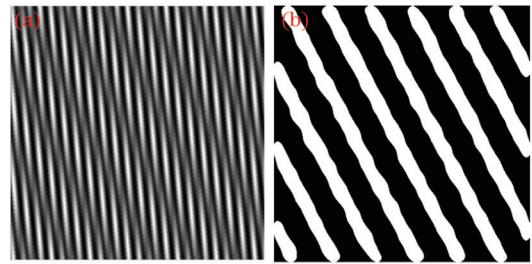


图 16 图像处理前后莫尔条纹图案的对比图。(a)处理前；(b)处理后

Fig. 16 Comparison of moire fringe before and after image processing. (a) Before processing; (b) after processing

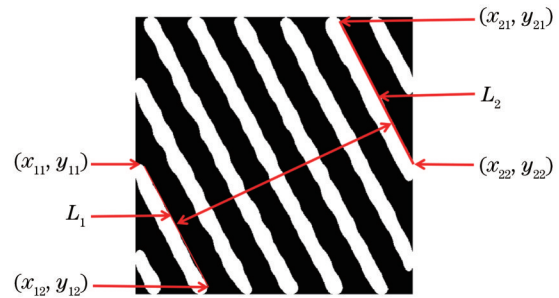


图 17 条纹参数求解原理图

Fig. 17 Schematic diagram of fringe parameter solution

式中： $n$ 为两条直线 $L_1$ 和 $L_2$ 间隔的条纹数量。

根据特征点的提取,可以在生成的条纹图案中选取白条纹边缘像素点坐标,即可根据式(6)和式(7)求解出直线 $L_1$ 和 $L_2$ 的方程,进一步通过式(8)和式(9)可求解出两直线的间距和倾斜角度。对于两直线的选取,应尽量选择间隔较远的两直线,用求得的间距除以两直线间隔条纹数 $n$ ,即可获得单一的条纹周期平均值。

为验证所提方法的准确性,采用多个实验样本进行误差验证,通过改变两张膜片的棱周期和旋转角度计算生成的莫尔条纹周期。由表3可以看出,实验结果与理论计算结果偏差较小,表明通过图像处理求解莫尔条纹参数的方法较为准确。

### 3.3.4 基于人眼模型的观测效果模拟

在Zemax中构建人眼模型,并提取其不同视场的点扩散函数,将点扩散函数导入到MATLAB中,对程序生成的莫尔条纹图案进行处理。构建一个光学镜头,调整入瞳直径、视场大小、工作波长和焦距等参数使其近似人眼。镜头结构如图18所示。该光学系统的入瞳直径为4 mm,全视场角为 $60^\circ$ ,工作波长在可见光波段中,焦距为15.98 mm。不同视场下该光学系统的点扩散函数如图19所示。点扩散函数提取的过程主要在Zemax中进行,通过其自带的快速傅里叶和点扩散函数分析功能,对光学系统的点扩散函数进行分析,并保存为文本格式,再将其导入到MATLAB中形成矩阵格式的点扩散函数,并进行下一步处理。

如图20所示,对原莫尔条纹图案与点扩散函数进行卷积运算,获得处理后的条纹图案。可以看出,处理

表 3 莫尔条纹计算结果误差比较  
Table 3 Error comparison of moire fringe calculation results

Edge period of diaphragm 1 / $\mu\text{m}$	Edge period of diaphragm 2 / $\mu\text{m}$	Rotation angle / ( $^\circ$ )	Experimental result of moire fringe period / $\mu\text{m}$	Theoretical result of moire fringe period / $\mu\text{m}$	Deviation / %
25	19	7	70.92	72.36	1.99
23	19	7	92.22	92.10	0.13
23	20	7	126.28	130.10	2.94
20	15	5	57.30	57.43	0.23
20	13	5	37.25	36.41	2.31

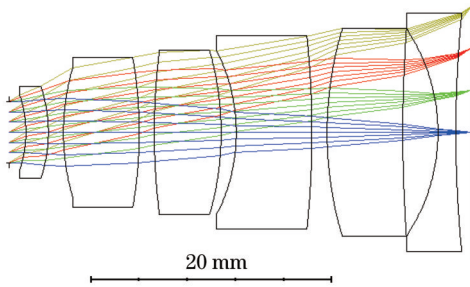


图 18 眼模型的镜头结构  
Fig. 18 Lens structure of eye model

后倾斜莫尔条纹更加明显,原背景条纹淡化,人眼的低通滤波效应会加强莫尔条纹的效果。

人眼的分辨率角约为  $1'$ ,明视距离(250 mm)处的分辨率为 13.75 lp/mm。对于液晶显示模组产生的莫尔条纹来说,当观测距离不一样时,人眼能够分辨的莫尔条纹频率是不一样的。对可见莫尔条纹周期的筛选需要充分考虑观测距离的影响。可见莫尔条纹的临界周期  $D_c$  为

$$D_c = \frac{L}{60} \times \frac{\pi}{180}, \quad (10)$$

式中: $L$ 为观测距离,即人眼与显示器间的距离。

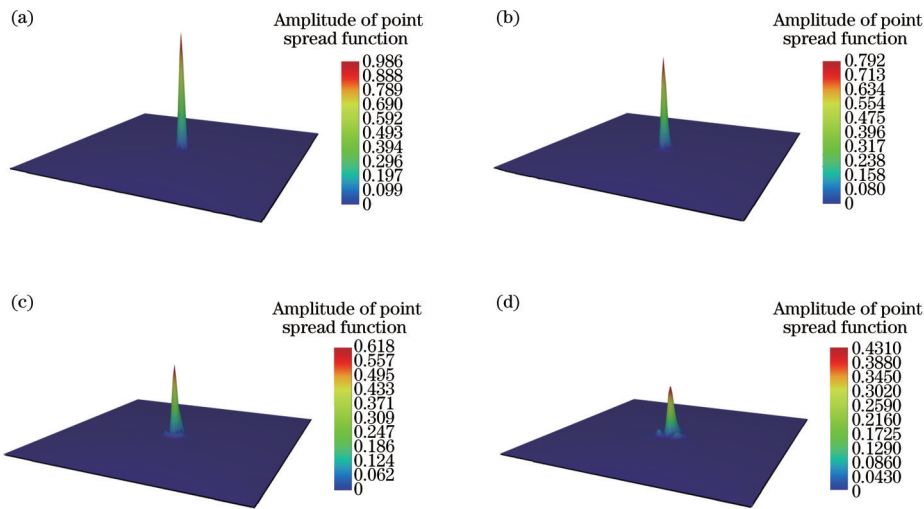


图 19 各视场的点扩散函数。(a) 0 视场;(b) 1 视场;(c) 2 视场;(d) 3 视场  
Fig. 19 Point spread functions of different fields of view. (a) Field of view 0; (b) field of view 1; (c) field of view 2; (d) field of view 3

## 4 结 论

对液晶电视显示中的莫尔条纹现象进行了研究,使用光学设计仿真软件 Zemax 对液晶电视显示模组中的双膜片结构进行了建模,搭建光路模拟了莫尔条纹图案的产生,并研究了偏转角度、视角等因素的影响。当棱状膜片叠加使用时,观测角度对莫尔条纹的影响较大,且当旋转夹角在特定范围内时会产生明显的莫尔条纹,观测距离会对莫尔条纹的周期、角度和可见性产生影响。因此,在液晶电视显示模组的设计中,

需要充分考虑不同条件对莫尔条纹消除的影响,为液晶电视莫尔条纹影响因素的研究提供了新的方法和途径。

同时,建立了基于 MATLAB 的单层面板和多层膜片的莫尔条纹参数预测计算模型,通过输入一组参数,加入相关误差,计算出可能产生的多组莫尔条纹相关参数,并生成直观的莫尔条纹图案。研究和预测液晶电视显示模组中产生的莫尔条纹对模拟不同膜片配比下液晶电视莫尔条纹的预测仿真和消除莫尔条纹对观测效果的影响具有重要意义。



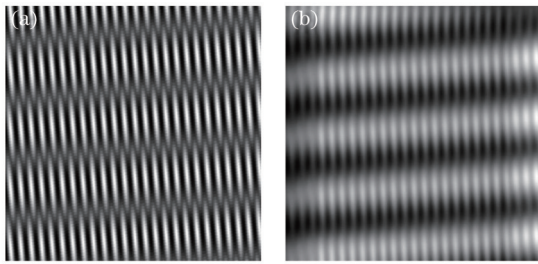


图 20 卷积处理前后莫尔条纹图案对比。(a)处理前;(b)处理后  
Fig. 20 Comparison of Moiré fringes before and after convolution processing. (a) Before processing; (b) after processing

## 参 考 文 献

- [1] 党玲玉. 基于莫尔纹信息动态显示效果的研究及应用[D]. 西安: 陕西科技大学, 2020.  
Dang L Y. Research and application of dynamic display effect of information based on Moiré[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2020.
- [2] 翟中生, 程壮, 张艳红, 等. 同心圆光栅莫尔条纹的光学分析[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 070501.  
Zhai Z S, Cheng Z, Zhang Y H, et al. Optical analysis of Moiré fringes of concentric-circle gratings[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(7): 070501.
- [3] 朱丽君, 王玉荣, 孟祥锋, 等. 数字合成莫尔条纹的频谱分析与滤波处理[J]. 中国激光, 2015, 42(12): 1209002.  
Zhu L J, Wang Y R, Meng X F, et al. Spectral analysis and filtering of moiré fringes generated by using digital image processing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(12): 1209002.
- [4] 欧阳春宝, 王艺, 熊瑛, 等. 莫尔放大器的高阶莫尔成像特征分析[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1223006.  
Ouyang C B, Wang Y, Xiong Y, et al. Analysis of high-order Moiré-imaging features of Moiré magnifier[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1223006.
- [5] 张雪. 基于图像分解的屏摄图像摩尔纹消除方法[D]. 天津: 天津大学, 2018.  
Zhang X. Moiré pattern removal from screen-shot images via image decomposition[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [6] 胡建青, 赵悟翔, 马晓莉, 等. 一种弱化莫尔条纹的狭缝光栅屏裸眼 3D 显示器[J]. 光学学报, 2018, 38(10): 1012002.  
Hu J Q, Zhao W X, Ma X L, et al. A naked-eye 3D LED display based on a parallax barrier with weak Moiré fringes[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(10): 1012002.
- [7] Li K Y, Zhou Y G, Pan D, et al. Global control of colored Moiré pattern in layered optical structures[J]. Optics Communications, 2018, 414: 154-159.
- [8] Chen E G, Cai J, Zeng X Y, et al. Ultra-large Moiré-less autostereoscopic three-dimensional light-emitting-diode displays[J]. Optics Express, 2019, 27(7): 10355-10369.
- [9] Zhou Y G, Fan H, An S Z, et al. Pseudo-random arranged color filter array for controlling Moiré patterns in display[J]. Optics Express, 2015, 23(23): 29390-29398.
- [10] Kim Y, Park G, Jung J H, et al. Color Moiré pattern simulation and analysis in three-dimensional integral imaging for finding the Moiré-reduced tilted angle of a lens array[J]. Applied Optics, 2009, 48(11): 2178-2187.
- [11] Kong L S, Jin G, Wang T C. Analysis of Moiré minimization in autostereoscopic parallax displays[J]. Optics Express, 2013, 21(22): 26068-26079.
- [12] 何胜斌. 侧光式 LED 液晶电视背光模组设计原理[J]. 电子科技, 2012, 25(3): 97-100.  
He S B. Design of the LED edge-lit LCD TV backlight module[J]. Electronic Science and Technology, 2012, 25(3): 97-100.
- [13] 谢洪波, 李保安, 徐爱国, 等. 液晶背光组中棱镜膜结构参数影响显示效果的模拟分析与验证[J]. 液晶与显示, 2008, 23(5): 549-554.  
Xie H B, Li B A, Xu A G, et al. Simulation and verification of effect of prism film parameters in LCD backlighting system[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2008, 23(5): 549-554.
- [14] Saveljev V, Kim S K, Kim J. Moiré effect in displays: a tutorial[J]. Optical Engineering, 2018, 57(3): 030803.
- [15] Saveljev V, Kim S K. Theoretical estimation of Moiré effect using spectral trajectories[J]. Optics Express, 2013, 21(2): 1693-1712.