

数字微镜器件投影系统的全反射式棱镜设计及系统性能优化

李 丹¹ 姚连芳¹ 徐西印¹ 曹 雯¹ 薛芸芸¹ 郭海成³ 张宝龙^{1,2,*}

¹天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222
²天津峰景光电科技有限公司, 天津 300384
³香港科技大学显示技术研究中心, 香港 九龙

摘要 直角全反射式(TIR)棱镜比传统 TIR 棱镜加工难度低,结构上体积减小 50%,重量减小 42%,从而降低成本。为了使结构便于加工,应用光学理论对直角 TIR 棱镜进行优化设计。最后运用光学软件对设计进行模拟,实验结果表明,系统效率从 53%降低到 48.3%,均匀性从 68%上升到 91%,证明了设计的直角 TIR 棱镜的合理性与可行性。

关键词 光学器件;直角全反射式棱镜;数字光处理;光程;照明

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201239.s216004

Design and Optimization of a Total-Internal-Reflection Prism in the Digital Micromirror Device Projection System

Li Dan¹ Yao Lianfang¹ Xu Xiyin¹ Cao Wen¹ Xue Yunyun¹
Guo Haicheng³ Zhang Baolong^{1,2}

¹ College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China

² Giant Optics Technology Limited, Tianjin 300384, China

³ Center for Display Research, the Hong Kong University of Science and Technology, Kowloon, Hong Kong, China

Abstract Compared with the traditional total-internal-reflection (TIR) prism, the right-angle TIR prism is convenient to process. Meanwhile, it decreases 50% in the volume and 43% in the weight, which lowers the cost. Using the theory of optics the right-angle TIR prism is optimized in order to make it easier to process the structure. In the optical software simulation, the system's efficiency decreases from 53% to 48.3%, while its uniformity can be enhanced from 68% to 91%. It proves that the right-angle TIR prism is reasonable and practicable.

Key words optical devices; right-angle total-internal-reflection prism; digital light processing; optical path; illumination

OCIS codes 220.2945; 230.4040; 230.5480; 290.2648

1 引 言

全反射式(TIR)棱镜^[1]是数字光处理(DLP)^[2]投影系统的关键部分,它和数字微镜器件(DMD)一起用来连接并区分照明光路和投影光路,它能有效屏蔽 DMD 平面状态(中间过渡状态)和关闭状态(投影机的暗场)的反射光,仅使开启状态的反射光

线进入镜头,有效地提高了系统的对比度;TIR 棱镜采用全反射原理,其反射率理论上为 100%,而镀有反射膜层(如铝,银等)的平面反射镜反射率仅为 90%左右^[3],因此 TIR 棱镜对投影系统关键性能参数如均匀性和亮度均起重要作用。通过优化 TIR 棱镜的角度与尺寸,设计了一款尺寸小、效率高和均

收稿日期: 2012-09-18; 收到修改稿日期: 2012-10-23

基金项目: 天津市科技支撑计划(12ZCZDGX02600)资助课题。

作者简介: 李 丹(1977—),女,博士,副教授,主要从事自由曲面非成像光学方面的研究。E-mail: lidan@tust.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: eezbl@tust.edu.cn

匀性好的直角 TIR 棱镜。

2 传统全反射式棱镜与直角全反射式棱镜比较

传统 TIR 棱镜^[4]和直角 TIR 棱镜^[5]基本结构如图 1 所示, TIR 棱镜由两块三角形棱镜胶合而成, 两块棱镜间留有 5~10 μm 的空气间隙, 此间隙在光线追迹模拟时可以忽略, 因而通过光线在该斜面上的透射和全反射实现入射光束和反射光束的区分。

如图 1 所示, 传统 TIR 棱镜采用先反射后透射的工作方式, 体积大, 重量大, 并且两个棱镜均是非特殊三角形, 增加了制作难度。直角 TIR 棱镜采用先透射后反射工作方式, 体积减小, 相应重量变轻; 同时在直角 TIR 棱镜中, DMD 反射后的光线只经过一块棱镜, 不会因引入两块棱镜之间的间隙而影响成像质量; 其次它的两个棱镜均为直角棱镜, 并且其中一个直角棱镜含有两个相等的直角边, 降低了加工难度, 综合比较直角棱镜的成本要比传统棱镜低很多。

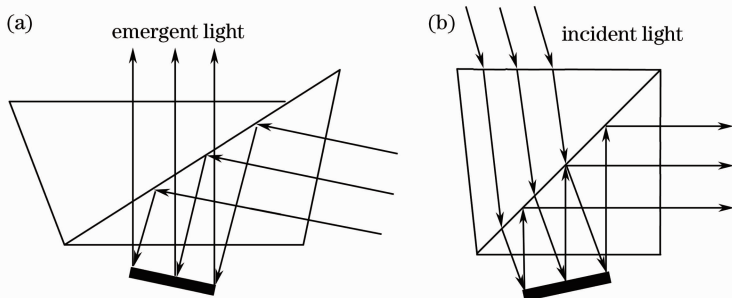


图 1 (a)传统 TIR 棱镜组和(b)直角 TIR 棱镜组

Fig. 1 Schematic of (a) conventional TIR prism set and (b) right-angle TIR prism set

3 直角全反射式棱镜分光原理

直角 TIR 棱镜的光路示意图如图 2, 直角 TIR 棱镜选用了两种折射率的材料, 可以有效地减小 DMD 角落的轴向色差, 提高均匀性^[6]。两块棱镜的折射率分别为 n_1 和 n_2 , 光源发光二极管(LED)发出的光线首先经过照明中继系统的整形收束, 然后从棱镜 TIR 2 的一个直角边进入, 经过棱镜 TIR 2 后在胶合面处直接透射进入棱镜 TIR 1, 光线经过棱镜 TIR 1 并从它的一个直角边出射, 最后光线到达面板 DMD, DMD 上的小微镜阵列将光线反射, 反

射光线再次从此边进入棱镜 TIR 1, 光线在交界面处发生全反射, 之后光线从棱镜的另一个直角边垂直出射, 最后光线进入镜头。

4 直角全反射式棱镜设计原理

区分光路主要由棱镜 1 实现, 棱镜 2 用来补偿光线在棱镜 1 中产生的光程差^[7]。当光线从中继系统垂直入射到棱镜时, 可以简化整体结构。方法一, 选取一条中心光线, 运用折射定律找到棱镜角度与入射光角度的函数关系式^[6]。当要求进入棱镜的光线为垂直光束时棱镜角度计算公式为

$$\alpha = \arcsin \left\{ \frac{n_1}{n_2} \sin \left[\frac{\pi}{4} - \arcsin \left(\frac{\sin 24^\circ}{n_1} \right) \right] \right\}, \quad (1)$$

方法二, 根据成像条件, 当入射的平行光束的光程差为零时, 从棱镜出射的光束到达 DMD 时均匀性较好, 因此可以通过平行光的光程相等来确定 TIR 棱镜的尺寸。采用方法二, 设计中 DMD 芯片转动角为 $\pm 12^\circ$, 两个角度分别为开启和关闭(亮态和暗态)两个状态, 此芯片的最大孔径角为 $\pm 12^\circ$, 在开启状态时要求主光线要与 DMD 表面垂直。

根据光路可逆性, 选择从 TIR1 平行入射到 DMD 上的两条光线 L_1 、 L_2 , 如图 3 所示, 在棱镜 TIR 1 中, 由于等腰直角三角形, 根据几何关系得到

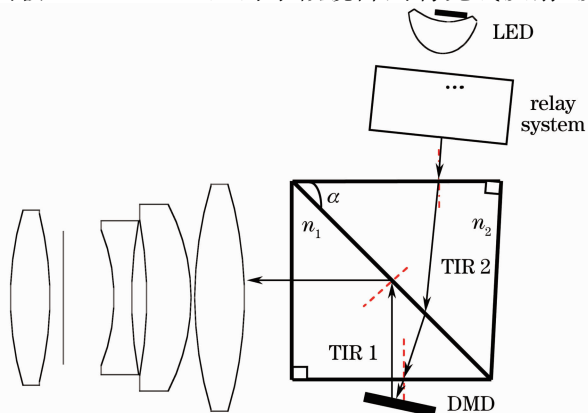


图 2 TIR 棱镜光路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of TIR prism optical path

此处光程关系式：

$$A_1B_1 + B_1C_1 = A_2B_2 + B_2C_2, \quad (2)$$

即此段光程相等,所以在计算光程相等时,可以简化为只考虑从 DMD 反射后透过两棱镜的光线。两条光线 L_1 、 L_2 的反射光在棱镜 TIR 1 中的光程差为

$$S_1 = (D_1E_1 - D_2E_2) \times n_1, \quad (3)$$

在棱镜 TIR 2 的光程差为

$$S_2 = (E_2F_2 - E_1F_1) \times n_2, \quad (4)$$

令经过两个棱镜的反射光光程相等可得

$$E_2F_2 = \frac{(D_1E_1 - D_2E_2) \times n_1}{n_2} + E_1F_1, \quad (5)$$

根据 DMD 芯片的尺寸与偏转角($\pm 12^\circ$)得到 PE_2 , 在 $\triangle E_2PE_1$ 中:

$$\angle E_1PE_2 = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{\sin 12^\circ}{n_1}\right), \quad (6)$$

$$\angle PE_1E_2 = \frac{\pi}{4} - \arcsin\left(\frac{\sin 12^\circ}{n_1}\right), \quad (7)$$

$$\frac{PE_2}{\sin(\angle PE_1E_2)} = \frac{E_1E_2}{\sin(\angle E_1PE_2)}, \quad (8)$$

$$\frac{QE_1}{QE_1 + E_1E_2} = \frac{E_1F_1}{E_2F_2}. \quad (9)$$

通过(5)~(9)式求解出 $\angle E_1OF_1$,从而确定了直角棱镜 TIR 2 的形状。TIR 2 棱镜边长由 DMD 芯片的边缘照明光线决定,TIR 1 棱镜尺寸由经 DMD 反射后进入棱镜并从另一侧出射的边缘亮态光束在此侧的出射位置决定。

对于相同的 DMD 芯片,分别使用传统 TIR 棱镜和直角 TIR 棱镜进行照明光路设计^[8],最后得到的两个棱镜具体参数如表1所示,与传统 TIR 棱镜

相比,直角 TIR 棱镜的优势有:体积减小 50%;重量减轻 42%;含有两个直角和两个 45° 特殊角,因此加工难度低。

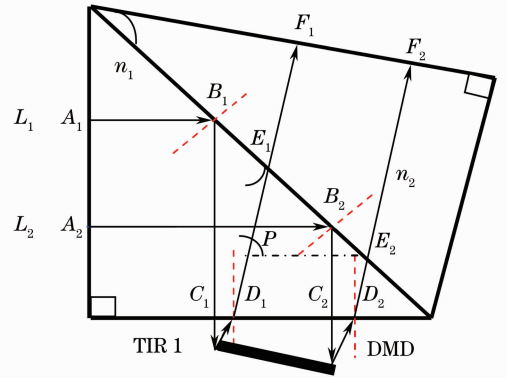


图 3 TIR 光程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of TIR optical path

表 1 传统 TIR 棱镜和直角 TIR 棱镜参数

Table 1 Parameters of conventional TIR prism and right-angle TIR prism

System	Conventional TIR prism	Right-angle TIR prism
Volume /mm ³	32×25×20	20×20×20
Weight /g	24	14
Right-angle number	0	2
45° angle number	0	2

5 均匀性与效率

将设计好的直角 TIR 棱镜和传统 TIR 棱镜分别添加到系统中,通过 Zemax 软件进行模拟仿真,得到屏幕上的照度图如图 4 所示。

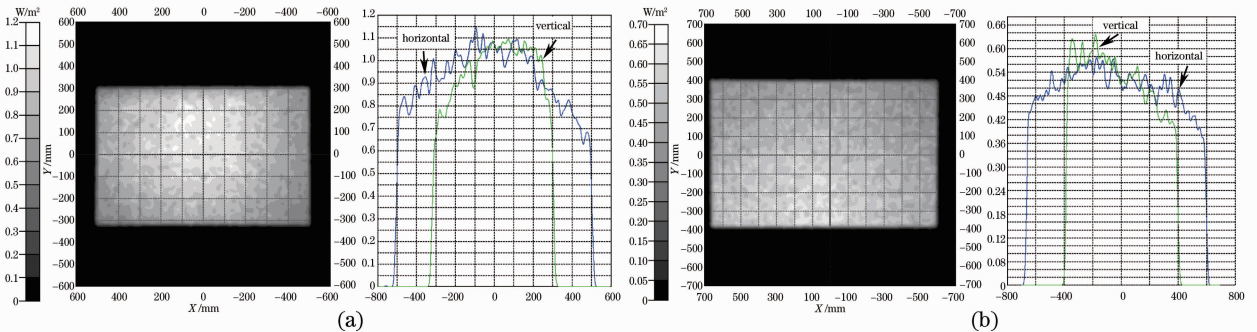


图 4 屏幕入射光能照度图。(a)传统 TIR 棱镜;(b)直角 TIR 棱镜

Fig. 4 Total illumination map for incident flux on the screen. (a) Conventional TIR prism; (b) right-angle TIR prism

对两个照度图进行照度均匀性^[1]分析,测量和计算方法如下式所示:

$$N = \left(1 - \frac{E_{\max} - E_{\text{ave}}}{E_{\text{ave}}}\right) \times 100\%. \quad (10)$$

提取照度图上 9 个等分块的中心照度值, $E_{\text{ave}} =$

$\sum_{i=1}^9 E_i / 9$ 其中 E_i 分别为各点的照度值, E_{ave} 为 9 点的平均值,另外在 4 个角上分别添加一个点, E_{\max} 为 13 点的最大值。

计算结果如表 2 所示,直角 TIR 棱镜效率指的

是通过棱镜后到达面板上的光线的比例,通过计算 TIR 效率降低了 9.7%,均匀性却提高了 34%。

表 2 TIR 棱镜的效率和均匀性

Table 2 Efficiency and uniformity of TIR prism

Item	Conventional	Right-angle
	TIR prism	TIR prism
Efficiency	53%	48.3%
Uniformity	68%	91%

6 结 论

设计了新款直角 TIR 棱镜,它由两个直角三角形胶合而成,其中一个为等腰直角三角形,另一个直角三角形的角度利用光程相等理论来推导出计算公式,通过这种方式设计的棱镜结构上体积减小 50%,重量减轻 42%,加工工艺简单;通过软件模拟效率降低了 9.7%,均匀性却提高 34%。通过对照度均匀性、加工复杂度以及整个系统的工作距离进行综合考虑以后,得知设计的 TIR 棱镜符合设计和生产要求。

参 考 文 献

- 1 Yang Fenghe. DLP Technology and DLP Based Projection Display Application [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, 2005, 26~30
杨风和. DLP 技术及其投影显示应用研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005, 26~30
- 2 Single-panel DLPTM projection system optics. <http://www.ti.com>
- 3 Liu Xu, Li Haifeng. Modern Projection Display Technology[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2008, 320~403
刘旭, 李海峰. 现代投影显示技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2008, 320~403
- 4 John W. Bowron, Reginald P. Jonas. Off-axis illumination design for DMD systems[C]. SPIE, 2003, 5186: 72~82
- 5 Jui-Wen Pan, Chih-Ming Wang, Wen-Shing Sun *et al.*. Portable digital micro mirror device projector using a prism[J]. Appl. Opt., 2007, 46(22): 5097~5102
- 6 Jui-Wen Pan, Sheng-Han Lin. Achromatic design in the illumination system for a mini projector with LED light source [J]. Opt. Express, 2011, 19(17): 15750~15759
- 7 Xu Jia. Investigation on Optical Engine of Projection Display System Based on LED [D]. Shanghai: East China Normal University, 2008, 36~39
徐佳. 基于 LED 的 DLP 投影显示光学引擎研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2008, 36~39
- 8 Zhou Jie. Studies on Theoretical Analysis and Application of the Optical Systems for Reflective Projection Displays [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005, 98~104
周杰. 反射式投影显示光学系统的理论分析和应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005, 98~104

栏目编辑: 韩 峰