

文章编号: 1001-3806(2018)03-0385-05

微型投影系统光路设计

钱立勇^{1,2}, 朱向冰^{1,2*}, 崔海田^{1,2}, 王元航^{1,2}

(1. 安徽师范大学 光电技术研究中心, 芜湖 241000; 2. 安徽省光电材料科学与技术重点实验室, 芜湖 241000)

摘要: 为了改善传统的数字光处理投影系统(DLP)体积较大、结构复杂、成本较高、对光源的利用效率较低的问题, 采用一种基于单颗三色发光二极管作为照明光源, 单颗透镜形成平行光的新型 DLP 投影光路结构的方法, 对传统光路进行了改进与优化。无需传统光路中的色轮, 透镜直接实现了传统投影光路中聚光和匀光的复杂结构, 并利用 TRACEPRO 软件进行建模, 通过光线追迹对该投影光路进行了光学分析。结果表明, 整个光学系统的体积控制在 76.8mm × 32.2mm × 25mm, 光能利用率达到了 60.1%, 光斑均匀性达到了 96.6%, 屏幕表面的光通量为 21.7lm。该研究减小了投影光路体积, 简化了光学结构, 提高了光能利用率。

关键词: 光学设计; 投影仪; 发光二极管; 透镜

中图分类号: TN202

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2018.03.018

Design of optical path for miniature projection systems

QIAN Liyong^{1,2}, ZHU Xiangbing^{1,2}, CUI Haitian^{1,2}, WANG Yuanhang^{1,2}

(1. Optoelectronic Technology Research Center, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China; 2. Anhui Province Key Laboratory of Optoelectric Materials Science and Technology, Wuhu 241000, China)

Abstract: In order to improve the problems of traditional digital light processing (DLP) projection system, such as, large volume, complex structure, high cost, and low utilization efficiency of light source, using single three-color light emitting diode as light source and using a novel DLP projection optical structure of forming parallel light by a single lens, the traditional optical path was improved and optimized. Without colorwheel in the traditional optical path, the complex structures of light gathering and light distribution in the traditional projection light path were realized by lens directly. After using TRACEPRO software to model, the projection light path was analyzed by ray tracing. The results show that, the volume of whole optical system is controlled at 76.8mm × 32.2mm × 25mm, utilization rate of light energy reaches 60.1%, spot uniformity reaches 96.6%, and luminous flux on screen surface is 21.7lm. The research reduces the volume of projection light path, simplifies the optical structure and improves the utilization ratio of light energy.

Key words: optical design; projector; light-emitting diode; lens

引言

微型投影技术是一种新型的现代投影显示技术, 它凭借自身的小型化、便捷化而逐步渗入到人们的日常生活中, 在当今飞速发展的信息化年代越来越受到人们的青睐, 成为投影显示的一大发展潮流。作为一种新兴固态光源, 发光二极管(light-emitting diode,

LED)具有体积小、寿命长、亮度高、色域广等特点^[1-6]; 结合数字光处理系统(digital light processing, DLP)投影具有高对比度、高分辨率的特点, 实现小型化的便携式微型投影, 满足人们对投影显示随身化的需求。

在投影显示领域, DLP 技术由美国德州仪器公司开发, 核心器件是数字微镜元件(digital micromirror device, DMD)^[7]。基于 DLP 投影原理, 人们进行了大量的科学研究, 如 ZHAO 等人提出的一种针对个人用户使用的微型投影机光学引擎^[8]; CHEN 等人研制出了一种具有较小视场的条纹投影系统^[9]; AN 等人针对传统投影光栅相位法的光学三角法模型进行了改进, 提出了一种新的光栅投影相位法系统模型及标定方法^[10]; 然而现有投影仪的整机体积、光斑均匀性和光能利用率还有待提高, 而这也是照明光学中的重要评

基金项目: 安徽省科技攻关资助项目(1301022058); 安徽省教育厅高校质量工程资助项目(2015gxxk011)

作者简介: 钱立勇(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事光学设计方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: asd05tx@126.com

收稿日期: 2017-05-11; 收到修改稿日期: 2017-06-22

价指标^[11]。

传统单片式 DLP 投影系统具有一个照明光路和一个投影光路,包括光源、反光碗、色轮、导光管、中继透镜、反射镜、DMD、吸收体和投影透镜^[12]。光源发出的光线经过椭圆反射器汇聚后,经过高速旋转的色轮分光,在任何一瞬间,白光经过色轮后,只有一种颜色的光透过,其它颜色的光被阻挡和吸收,透过的光线与导光管耦合入射到中继透镜上,经过中继透镜汇聚后入射到反射镜上,在反射镜表面改变一次光路方向后入射到 DMD 表面,DMD 表面众多的微镜在 $\pm 12^\circ$ 两个方向高速翻转,当微镜处于 $+12^\circ$ 时光线进入投影透镜,反之被吸收体吸收。这种传统的单片式投影系统的缺陷是:一方面,使用的元器件较多、结构复杂,体积较大,难以降低整机的体积,过多的元器件也导致了整机的电光转换效率低,不仅对光能的损耗较为严重,更主要的是损耗的光能使整个投影系统的温度升高,对整个投影系统的散热造成了一定的影响,同时,过多的元器件也导致了整机的成本较高;另一方面,考虑到投影光斑均匀性的要求,光线经过中继透镜时难免会产生像差,对光源的均匀性也造成了一定的影响。

1 整体光路设计

为了解决上述问题,本文中提出了一种基于 LED 和透镜的低成本微型投影系统光路设计,如图 1 所示。包括光源、透镜、数字微镜元件、投影透镜、吸收体;投影系统中不含色轮、不含二向色镜、不含导光管。解决了现有的投影系统结构复杂、元器件较多、体积较大、成本较高、散热困难等问题,简化了投影系统的光学结构,缩小了整机的体积,降低了成本,提高了光能的利用率。

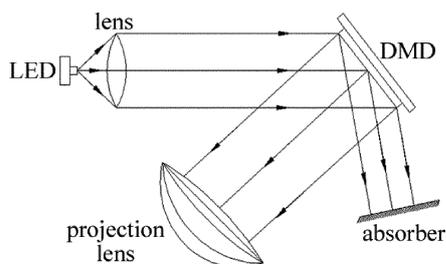


Fig. 1 Optical design

2 DMD, LED 和透镜的选择

2.1 DMD 的选择

数字微镜元件由美国德州仪器公司于 1987 年发明,本质是一个反射式数字半导体光分布调制器,在

CMOS 存储芯片上构建数以百万计的微反射镜面, DMD 通过精确控制每个微镜的偏转角度来实现图像成像,生成动态图像信息^[13]。在没有通电时,数字微镜元件上所有的反射镜都静止在平衡位置,该位置称为平板状态,数字微镜元件通电后每个反射镜都可以绕着自己的转轴旋转,每个反射镜至少有两个稳定的工作状态。在第 1 个稳定的工作状态时,如图 2 所示。反射镜的镜面与该反射镜平板状态时的镜面的夹角为 θ ,在本文中设计的光路中,反射镜处于第一稳定状态下,大部分入射到反射镜上的光线在反射镜上的入射角接近于反射镜相对于自身平板状态的角度,大部分被反射镜反射的光线的方向几乎垂直于平板状态,并被投影透镜接收后投射到屏幕上,经过屏幕漫反射以后进入用户眼中,用户看到清晰的图像。

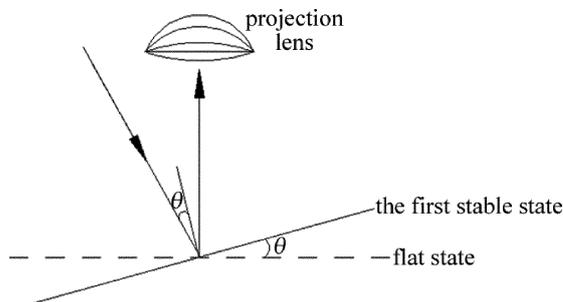


Fig. 2 Schematic diagram of light while the mirror is in the first steady state

在反射镜处于第 2 个稳定的工作状态时,如图 3 所示。反射镜的镜面与该反射镜平板状态时的镜面的夹角为 β ,绝大部分被反射镜反射的光线不能进入投影透镜,而是被吸收体所吸收,大部分入射到反射镜上的光线在反射镜上的入射角接近于 $2\theta - \beta$ 。

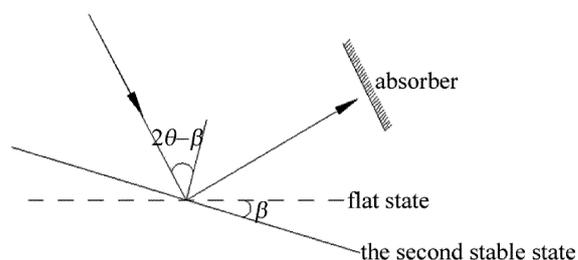


Fig. 3 Schematic diagram of light while the mirror is in the second steady state

LED 光源发出的光线经过透镜后,入射到数字微镜表面,数字微镜元件反射的光线近似是平行光,在保证 LED 发出的光线不被遮挡的前提下,数字微镜元件不需要在投影透镜的物平面附近,数字微镜元件和投影透镜之间的距离可以任意设置,屏幕到投影透镜之间的距离可以在较大范围内自由设定。

为了保证投影仪的体积小,选择了 TI 公司的

DLP5500 型号的 DMD 芯片,该芯片的分辨率为 1024pixel × 768pixel,封装尺寸为 22.30mm × 32.20mm,具体的参量如表 1 所示。

Table 1 DMD chip of DLP5500 type

chip size	0.55inch(1inch=2.54cm)
micromirror pitch	10.8μm
length to width	11.059mm × 8.294mm(4:3)
tilt angle	±12°
reflectivity	88%
broadband visible light	420nm ~ 700nm

2.2 LED 光源的选择

三色 LED 可以同时发出红、绿、蓝 3 种颜色的光线,可以满足投影仪照明的需要。选用 CREE 公司的 CLMVB-FKA 型号的 LED 灯珠。该灯珠的相对发光强度光谱图如图 4 所示。与选用的 DMD 芯片表面宽带波长匹配。发光强度为:红(224mcd ~ 450mcd) @ 20mA;绿(180mcd ~ 450mcd) @ 10mA;蓝(56mcd ~ 140mcd) @ 10mA。该 LED 的封装尺寸为 2mm × 2mm × 0.9mm,非常适合微型投影仪的光路设计。

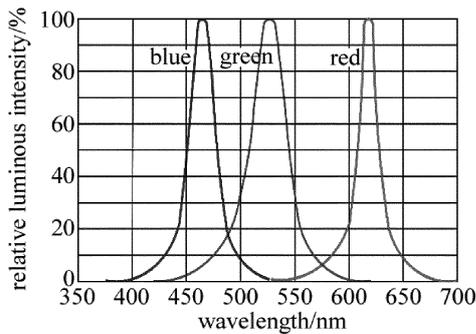


Fig. 4 Spectrum of relative luminous intensity

2.3 透镜的选择

为了满足 LED 发出的光线经过透镜后完全的入射到数字微镜的表面,选用了 YJM-∅18mm 光学玻璃凸透镜,该透镜的具体参量如表 2 所示。透镜的内径是 16mm,数字微镜元件阵列的对角线长度是 13.8mm,保证了经过透镜后的光线可以入射到数字微镜的整个表面。该透镜的焦距 $f = 14.5\text{mm}$,光源在透镜的光轴上,与透镜之间的距离为 f ,确保 LED 光源发出的光线经过透镜后,平行于透镜的主轴入射到数字

Table 2 Specific parameters of lens

outside diameter	18mm
inside diameter	16mm
height	7mm
thick side	2mm
focal length	14.5mm

微镜表面。

3 投影镜头的设计

考虑到投影仪本身的体积紧凑以及与 DMD 的尺寸匹配,在镜头库中选择了一组五片式的投影镜头,有 4 个球面透镜和 1 个非球面透镜,其中镜头的入瞳直径为 20.8mm。如图 5 所示,得到 ZEMAX 软件进行仿真的光线追迹图。

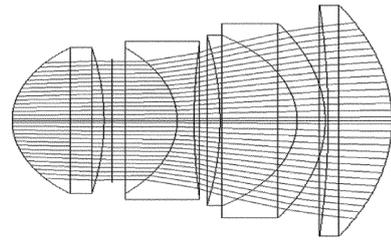


Fig. 5 Schematic of projection lens

为了降低成本,球面透镜材料为普通玻璃,非球面透镜材料为有机玻璃 (polymethyl methacrylate, PMMA),有效地控制了成本。结合 ZEMAX 软件,修改镜头的焦距、工作距离、视场角等参量,达到:(1)镜头的视场角控制在 60°左右;(2)在 50lp/mm 处,镜头的调制传递函数(modulation transfer function, MTF)值大于 0.5;(3)畸变小于 1%。利用 ZEMAX 软件进行优化,优化结果如图 6 所示,图中 TS 代表子午弧矢(tangential sagittal)。

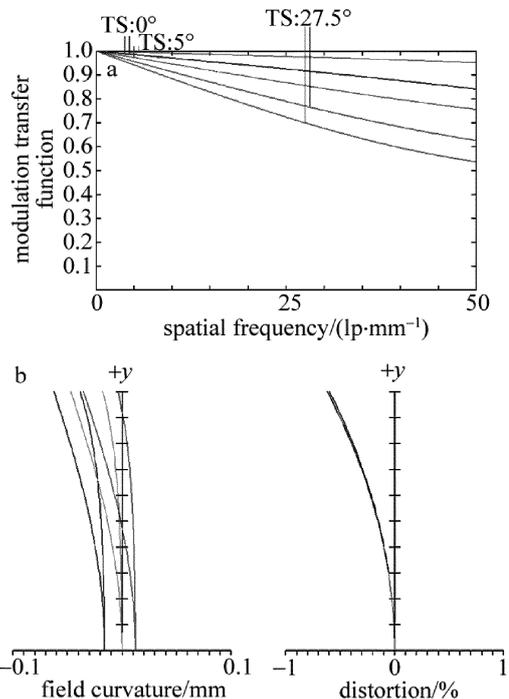


Fig. 6 Optimization results of projection lens

a—modulation transfer function curves b—field curvature and distortion

根据投影镜头的技术指标以及投影镜头的具体参量,对镜头库中选中的模型进行优化,对镜头的视场角、焦距、工作距离进行了限制。利用 ZEMAX 软件优化后该投影镜头的焦距为 14.6mm,镜头的入瞳直径为 20.2mm,镜头的总长度为 76.8mm,视场角为 50°,具体的镜头系统结构参量如表 3 所示,表中, r_i 为曲率半径, d_i 为系统前后组之间主面的间隔。从优化结果的调制传递函数曲线中明显可以看出,在 50lp/mm 处,镜头的 MTF 值大于 0.5,从畸变图可以看出,镜头的畸变小于 1%,因此优化的结果达到了预期的目标。

Table 3 Optical parameters of lens

i	r_i/mm	d_i/mm	material
1	39.93	1.86	PMMA
2	8.268	14.54	
3	57.683	1.63	H-LAF3A
4	18.809	4.27	
5	20.867	13.16	ZF7L
6	-87.862	3.33	
7	infinity	6.95	
8	-22.955	1.21	ZF7L
9	16.444	7.00	H-LAK50A
10	-34.823	0.16	

4 仿真与结果分析

根据以上选择的模型和利用 ZEMAX 仿真得到的参量,在 TRACEPRO 软件中建立了一个 3 维模型,包括 LED、透镜、DMD、投影镜头,整个光学系统的体积控制在 76.8mm × 32.2mm × 25mm。使用厂家提供的 LED 模型,透镜和 DMD 也严格按照厂家标准设置尺寸、焦距、反射率、折射率;投影镜头按照 ZEMAX 软件优化后导入到 TRACEPRO 软件中。追迹 300 万条光线,得到照度图如图 7 所示。

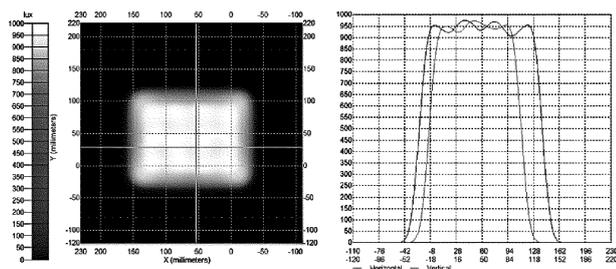


Fig. 7 Illumination chart of projection system

根据美国国家标准协会规定的 9 点照度均匀性公式^[14]:

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

式中, U 代表均匀性, E_{\max} 是 9 个取样点的最大照度值, E_{ave} 是平均照度值。得到整个投影系统的照度均匀性为 96.6%,满足了投影仪屏幕的照度均匀性要求。

投影距离为 50cm ~ 60cm,屏幕上至少需要光通量 20lm,此时屏幕亮度与笔记本电脑的屏幕亮度基本相当^[8]。在仿真过程中,将屏幕设置在距离投影镜头 0.5m 的位置,根据 TRACEPRO 软件追迹的光线结果,得到各个光学软件的光能利用率和表面光通量,如表 4 所示。光能的利用率为 60.1%,屏幕的光通量为 21.7lm。

Table 4 Analysis of ray tracing results

	light energy utilization/%	luminous flux/lm
LED	81.5	36
lens	93.5	29.3
DMD	88.0	27.4
projection lens	89.6	24.1
screen	60.1	21.7

5 结论

提出了一种结构简单、体积紧凑的微型投影系统,目的是为了携带方便、节约成本,满足个人用户使用需求。选用了特定的 LED 灯珠、透镜、DMD,单颗三色 LED 发出的光线经过透镜后直接形成平行光,入射到 DMD 的表面,整个光学系统的体积控制在 76.8mm × 32.2mm × 25mm。利用 ZEMAX 软件对投影镜头进行了优化,将整个光路元器件导入到 TRACEPRO 软件中,进行光线追迹和结果分析。结果表明,整个投影系统的光能利用率为 60.1%,照度均匀性为 96.9%,距离投影镜头 0.5m 处,屏幕表面的光通量为 21.7lm,符合微型投影仪的设计指标。该设计方案大大简化了光学结构,减小了整机的体积,降低了成本,解决了后续的微型投影系统的设计难题,具有一定的市场前景。

参考文献

- [1] JIANG X M, ZHU X Y, LIU T, *et al.* Design and implementation of LED indoor visible light voice communication system [J]. *Laser Technology*, 2014, 38(6):807-812 (in Chinese).
- [2] CHANG F, SUN Zh Y, WANG R G, *et al.* Improvement method of non-uniformity correction of LED display image [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(4):929-937 (in Chinese).
- [3] LIANG H J, DENG J, WANG G, *et al.* Design and application of synchronous trigger light sources for high-speed photography [J]. *Laser Technology*, 2016, 40(3):331-334 (in Chinese).
- [4] ZHOU Q Ch, BAI Z L, LU L, *et al.* Remote phosphor technology for white LED applications: advances and prospects [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3):313-328 (in Chinese).
- [5] FENG Q B, LI Y N, LI Q G, *et al.* Design of free-form surface lens

- based on light-emitting diode light distribution curve [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(8):1884-1893 (in Chinese).
- [6] LIU Q, LIU Q N. Divergence characteristics of light spot of a circular LED array [J]. Laser Technology, 2015, 39(6):858-862 (in Chinese).
- [7] WANG Ch, HAO W L, TIAN L W, *et al.* Design of miniature DLP projective optical path based on new type light guide tube [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(8):2472-2477 (in Chinese).
- [8] ZHAO X, FANG Zh L, CUI J Ch, *et al.* Research on micro-projector optical Engine [J]. Acta Optical Sinica, 2007, 27(5):913-918 (in Chinese).
- [9] CHEN Ch, YU Y Q, HUANG Sh J, *et al.* 3-D small-field imaging system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(8):0824002 (in Chinese).
- [10] AN D, CHENG L, DING Y F, *et al.* Optical system model and calibration of grating projection phase method [J]. Chinese Optics, 2015, 8(2):248-254 (in Chinese).
- [11] HOU Y. Design of lens to realize small angle lighting for LED [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(5):0518004 (in Chinese).
- [12] GÜNTHER A. Optical concept for an active headlamp with a DMD array [J]. Proceedings of the SPIE, 2008, 7003:70032D.
- [13] LI Zh, MOU D, LÜ Sh L, *et al.* Design of zoom LWIR projection system based on DMD [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(12):1218003 (in Chinese).
- [14] ZHEN Y, YE Z, YU F. Ultrahigh-performance lamp illumination system with compound parabolic retroreflector for a single liquid-crystal-on-silicon panel display [J]. Optical Engineering, 2007, 46(5):054001.