

基于新型导光管的微型 DLP 投影式光路设计

王 程¹, 郝文良¹, 田丽伟¹, 王若飞², 朱向冰¹

(1. 安徽师范大学 物理系, 安徽 芜湖 241000; 2. 奇瑞新能源汽车技术有限公司, 安徽 芜湖 241000)

摘 要: 传统的数字光处理(DLP)技术无法收集利用数字微镜(DMD)芯片上微镜处于“OFF”态时反射的光线, 针对这种缺陷, 提出一种基于新型导光管的微型 DLP 投影光学系统的设计方案, 该系统包括 LED、导光管、色轮、准直系统和投影透镜。提出在锥形导光管的基础上加上一根弯型的导光管和复合抛物面聚光器(CPC)用来收集被 DMD 反射的多余的光线。先用非成像光学的理论分析和计算出各部分的相关参数, 再用 ZEMAX 软件对准直系统和投影透镜进行结构优化, 最后用 TracePro 软件建立模型并仿真, 仿真结果表明: 随着“OFF”态微镜数量的增加, 收集光管提高系统光能利用率的能力先增加后减小。相比没有收集光管的情况, 当 DMD 芯片上处于“OFF”态微镜数量为 50% 时, 导光管提高的光能利用率最多, 为 5.91%。

关键词: 光学设计; LED; DMD; 导光管; 光能利用率

中图分类号: O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2472-06

Optical design of micro DLP projection based on novel light pipe

Wang Cheng¹, Hao Wenliang¹, Tian Liwei¹, Wang Ruofei², Zhu Xiangbing¹

(1. Department of Physics, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China;

2. Chery New Energy Automotive Technology Co. Ltd, Wuhu 241000, China)

Abstract: Traditional DLP technologies can not collect and utilize the light which is reflected by the micromirrors of DMD in the "OFF" state. Aiming at this defect, one design scheme of the micro DLP projection system based on a novel light pipe was presented. This system included LEDs, light pipe, color wheel, the collimation system and projection lens. A bending light pipe was added on the base of the tapered light pipe, and a compound parabolic concentrator (CPC) was used in the input end to collect the extra light reflected by the DMD. First, the related parameters of each part were analyzed and calculated according to the nonimaging optics theory. Second, the collimation system and projection lens were optimized by ZEMAX software. Finally, the model was built and simulated in TracePro software. The simulation results show that: with the number of micromirrors in the "OFF" state growing, the improving light efficiency ability of collecting light pipe first increases then decreases. Comparing with having no collecting light pipe, the light efficiency is increased by 5.33%; light pipe improves the most light efficiency, 5.91%, when half of the micromirrors are in the "OFF" state.

Key words: optical design; LED; DMD; light pipe; light efficiency

收稿日期: 2014-12-05; 修订日期: 2015-01-08

基金项目: 安徽省科技攻关项目(1301022058)

作者简介: 王程(1989-), 男, 硕士生, 主要从事光学设计方面的研究。Email: cheng0808066@163.com

导师简介(通讯作者): 朱向冰(1973-), 男, 教授, 主要从事光学设计方面的研究。Email: asd05tx@126.com

0 引 言

单片式数字光处理 (Digital Light Processing, DLP)微投影系统是一种结构紧凑、小型化的投影系统,在投影市场中所占的份额越来越大。DLP 技术由美国德州仪器公司开发,核心器件是数字微镜 (Digital Micro-Mirror Device, DMD)。前人关于 DLP 技术做出了大量的研究,如 Jui-Wen Pan 等人提出一种能消除系统色差的棱镜^[1]; Qiu Song 等人提出用 LED 作为系统的光源^[2]; Dawei Rui 等人提出一种新型复眼系统,并用激光作为 DLP 投影系统的光源^[3]。单片式微投影系统不仅可以应用于投影机中,也可应用到汽车自适应前照灯中,实现各种照明模式^[4-5]。LED 具有寿命长、环保节能、体积小、启动快等一系列优点。随着 LED 技术的发展,人们很自然将 LED 应用到 DLP 投影技术中^[6]。

1 单片式 DLP 技术存在的缺陷

传统的单片式 DLP 微投影系统结构如图 1 所示。光源发出的光线经过椭圆反射器的聚光后进入导光管中,导光管具有均匀光束的作用,光束离开导光管再经过中继系统和反射镜后均匀地照射到 DMD 上。DMD 上拥有数百万个微镜,在±12°两个位置上高速翻转,当微镜处于+12°时,光线被反射到投影镜头上;当微镜处于-12°时,光线反射到吸收体上被吸收。这种光路的缺陷是:当微镜处于-12°状态时,光线不能被有效利用起来,而是被吸收体吸收了。这样不仅会造成系统的光能利用率低,而且还会增加系统的热量。

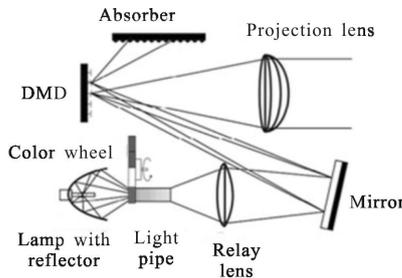


图 1 单片式 DLP 微投影机光路结构
Fig.1 Optical structure of single-piece micro DLP projection

2 整体光学方案和设计原理

2.1 整体方案

针对以上技术缺陷,文中提出一种光学设计方

案,如图 2 所示,该系统包括 LED、导光管、色轮、准直系统和投影透镜。该方案在锥形导光管的基础上加上一根弯型的导光管,在弯型导光管的入光口加上一个复合抛物面聚光器,用来收集被 DMD 反射的多余的光线。多余的光线被收集后又重新回到主光管中,提高系统的光能利用率,同时减少系统的热量。使用 3 颗 LED 与主光管直接耦合以及采用锥形导光管来增加系统的光能利用率。

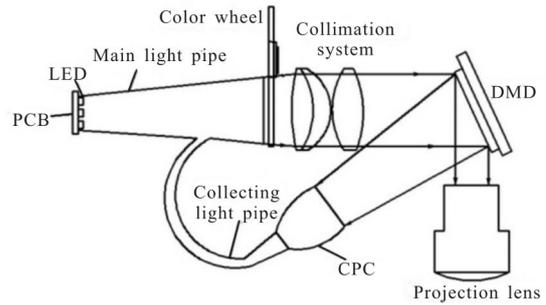


图 2 光学设计方案
Fig.2 Optical design scheme

2.2 设计原理

光学扩展量守恒是非成像光学中的重要原理,也是投影照明系统设计中的依据,其表达式为:

$$E = n^2 \int \cos \theta dA d\Omega = n^2 \pi A \sin^2 \theta \quad (1)$$

式中: E 为光学扩展量; n 为光通过介质的折射率; A 为目标物体面积; Ω 为立体角; θ 为立体角 $d\Omega$ 的中心轴和物体面积 dA 之间的夹角。

入射到 DMD 上的照明光束的 F 数(光圈值)为:

$$F = \frac{1}{2NA} = \frac{1}{2n \sin \theta} \quad (2)$$

式中: NA 为光束的数值孔径。

由公式(1)和(2)可知,对于一个空间角分布均匀的平板(如 DMD),光学扩展量为:

$$E = n^2 \pi A \sin^2 \theta_{\frac{1}{2}} = \frac{\pi A}{4F^2} \quad (3)$$

式中: $\theta_{\frac{1}{2}}$ 为光束的发散角。

3 DMD 芯片和 LED 光源选择

3.1 DMD 芯片选择和模型建立

为了保证高分辨率和结构紧凑的特征,选择 TI 公司的 dlp7000 型 DMD 芯片,其光学参数如表 1 所示。

表 1 dlp7000 型 DMD 芯片

Tab.1 DMD chip of dlp7000 type

Chip size	0.7 in(1 in=2.54 cm)
Micromirror pitch	13.68 μm
Tilt angle	$\pm 12^\circ$
Length to width	20.736 mm \times 11.664 mm(16:9)
Reflectivity	88%

DMD 工作时,芯片上的每个微镜都有两种状态:“ON”态(+12°)和“OFF”态(-12°)。光线经过 DMD “ON”态(+12°)反射后应该平行地进入投影镜头中,所以选择光源光线以 33°的入射角照射到 DMD 芯片上,DMD 两种状态下的光束如图 3 所示。“OFF”态反射的光线是未被利用的,用复合抛物面聚光器(Compound Parabolic Concentrator,CPC)收集起来。

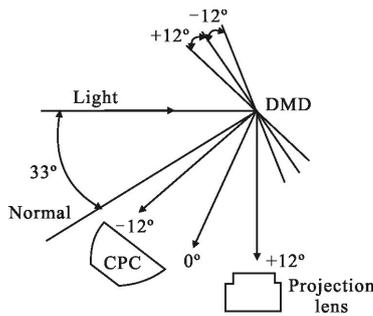


图 3 DMD 两种状态下的光束

Fig.3 Light of DMD under two states

3.2 LED 光源选择

CREE 公司的 XLamp Q-E 型号的白光 LED 光源尺寸很小,只有 1.6 mm \times 1.6 mm \times 1.44 mm,发散角为 110°,光通量为 252 lm,很适合做微小系统的光源。用积分球测 XLamp Q-E 的光通量和光谱如图 4 所示,光通量为 248 lm,点亮 LED 30 min 后测量 LED 的光通量衰减小于 5%。

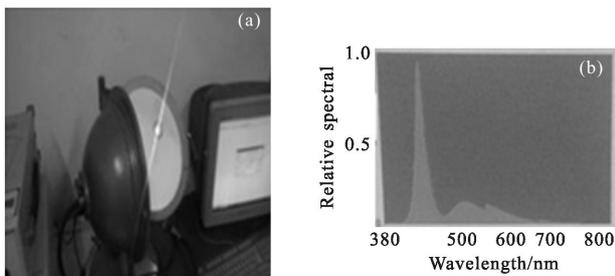


图 4 用积分球测量 LED 的光通量和光谱

Fig.4 Measuring LED luminous flux and spectrum by integrating sphere

下面计算所需 LED 的数量。根据光学扩展量守恒的原理,LED 光源的光学扩展量应该小于或等于 DMD 的光学扩展量,即:

$$E_{\text{LED}} \leq E_{\text{DMD}} \quad (4)$$

由前文 DMD 芯片光学参数可知 DMD 在 $\pm 12^\circ$ 方向翻转,代入公式(2)得到 F 数(光圈数)为:

$$F = \frac{1}{2NA} = \frac{1}{2n\sin\theta} = \frac{1}{2 \times \sin 12^\circ} = 2.4 \quad (5)$$

光线是以 $\theta^* = 33^\circ$ 的入射角照射到 DMD 上,将 F 数(光圈值)代入公式(3),得到 DMD 的光学扩展量 E_{DMD} 为:

$$E_{\text{DMD}} = \frac{\pi A}{4F^2} \cos\theta^* \approx 27.645 \text{ mm}^2 \cdot \text{sr} \quad (6)$$

XLamp XQ-E 型号 LED 光源的发散角为 110°,所以 LED 光源的光学扩展量 E_{LED} 为:

$$E_{\text{LED}} = n^2 \pi A_{\text{LED}} \sin^2 \theta_{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

再根据公式(4),得:

$$A_{\text{LED}} \leq \frac{E_{\text{DMD}}}{n^2 \pi \sin^2 \theta_{\frac{1}{2}}} \approx 13.121 \text{ mm}^2 \quad (8)$$

综上所述,选择 3 颗 XLamp XQ-E 型号的白光 LED。

4 导光管设计

4.1 主光管设计

主光管采用正置锥形结构,即小口为入射端,大口为出射端。锥形结构的导光管比矩形结构的导光管聚光效果好,出射端的光束口径较小。正置锥形导光管的光能利用率要高于倒置锥形导光管。为了使主光管和 DMD 匹配良好,主光管出射端的长宽比例要与 DMD 芯片的长宽比例一致,所以主光管出射端的长宽取 16 mm \times 9 mm。一般认为导光管的长度是入射端和出射端对角线长度之和的 1.5 倍时,既能保证光能利用率,又能达到均光的效果^[7]。这里主光管长度取 40 mm,入射端长宽取 8 mm \times 3 mm。主光管内部是空心结构并且镀上高反射率的膜,使光束在其内部发生镜面反射。

LED 与主光管直接耦合,根据前文 LED 的横截面积为 1.6 mm \times 1.6 mm,将 3 颗 LED 集中到一块 PCB 板上,然后与主光管入射端耦合。

4.2 收集光管设计

收集光管与主光管连接部分的口径应尽量小,弯曲部分的弧度应尽量大,避免主光管中的光线射入到收集光管中;收集光管另外一端与 CPC 相连,CPC 的口径应大些,这样可以收集到更多的光线。所以在 CPC 和弯形部分之间加一段圆锥形光管。

4.2.1 CPC 设计

CPC 是根据边缘光学原理设计的非成像聚光器,若入射端半径为 b ,出射端半径为 a ,则 CPC 的最大收集角 θ_{\max} 满足:

$$\sin \theta_{\max} = \frac{a}{b} \quad (9)$$

如果入射光线与光轴的夹角大于 θ_{\max} ,光线将被 CPC 反射回去,不能被收集;如果入射光线与光轴的夹角小于 θ_{\max} ,光线可以被 CPC 收集。CPC 的焦距 f 为:

$$f = a(1 + \sin \theta_{\max}) \quad (10)$$

CPC 的长度 L 为:

$$L = \frac{a(1 + \sin \theta_{\max}) \cos \theta_{\max}}{\sin^2 \theta_{\max}} = \frac{f \cos \theta_{\max}}{\sin^2 \theta_{\max}} \quad (11)$$

根据图 3 可以推出,CPC 应与竖直方向成 48° 放置,入射端半径 $b=10 \text{ mm}$,CPC 的最大收集角 $\theta_{\max}=30^\circ$,再根据公式(9)~(11)可得 CPC 其余参数为: $a=2.5 \text{ mm}$, $f=3.75 \text{ mm}$, $L=10.6 \text{ mm}$ 。

为了减小后面弯型部分光管的口径,在 CPC 出射端加上一小段圆锥形光管,它的大口半径为 5 mm ,小口半径为 1 mm 。

4.2.2 弯形光管设计

导光管类似光纤,在弯曲时会发生弯曲损耗,按照 LucB. Jeunhomme 理论,弯曲损耗 a_R 有如下公式:

$$a_R = -10 \lg \frac{P \exp(-a_p)}{P_i} = 4.3429 a_p = \frac{4.3429 \pi w u^2}{2 \beta a^2 (1+w) v^2 k_1^2(w)} \exp\left(-\frac{2w^3}{3\beta^2 a^2} \frac{R}{a}\right) \quad (12)$$

式中: $k_1(w)$ 为一阶第二类修正的贝塞尔函数; u 为径向归一化相位常数; v 为归一化频率; w 为径向归一化衰减常数; R 为弯曲半径; a 为纤芯半径。从公式(12)可以看出:弯曲半径 R 越大,弯曲损耗 a_R 就越小。但是如果弯曲半径太大又会影响微投影仪的整体尺寸,这里取弯曲半径和光管的口径比为 $13:1$,即 $R=13 \text{ mm}$ 。经过在光学软件上反复仿真,弯型导管的

弧度取 $\frac{10\pi}{9}$ (200°) 时,可以与主光管匹配良好。图 5 为导光管的整体示意图。

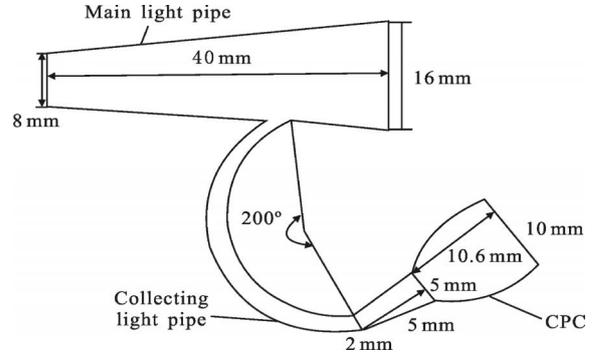


图 5 导光管的整体示意图

Fig.5 Overall schematic of light pipe

5 准直系统和投影镜头设计

5.1 准直系统设计

光束通过导光管后发散角较大,需要经过透镜准直才能照射到 DMD 上。用一个胶合透镜加上一片凸透镜的组合来实现光束的准直。

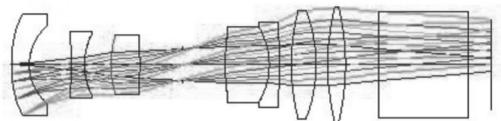
5.2 投影镜头设计

5.2.1 设计指标

根据 DMD 的尺寸和微投影系统的基本要求得出投影镜头的设计指标:(1)相对孔径在 $1/2.0$ 以上;(2)视场角 2ω 在 60° 左右;(3)有效焦距 EFL 在 9 mm 左右,总长度小于 100 mm ;(4)在 46 lp/mm 处,MTF 值大于 0.5 ;(5)畸变小于 3% 。

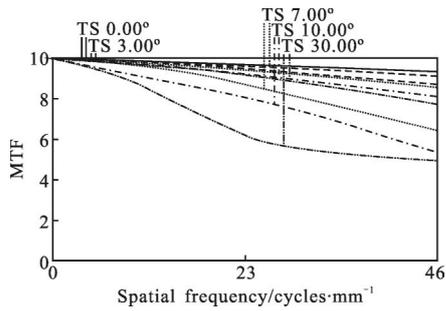
5.2.2 初始结构选择和结构优化

投影镜头一般采用远距结构(焦距短,后工作距离长),这样可以在较短的距离内投射出较大的投影面积。在镜头手册中选择一种 7 片式的投影镜头作为初始结构。初始结构与所设计指标有一定的差别,用 ZEMAX 软件进行优化后得到一款符合设计指标的投影镜头,图 6 为投影镜头的优化结果。



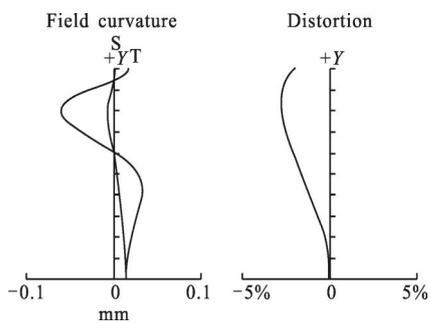
(a) 投影镜头示意图

(a) Schematic of projection lens



(b) MTF 图

(b) MTF



(c) 畸变图

(c) Distortion

图 6 投影镜头优化结果

Fig.6 Optimization results of projection lens

6 仿真与结果分析

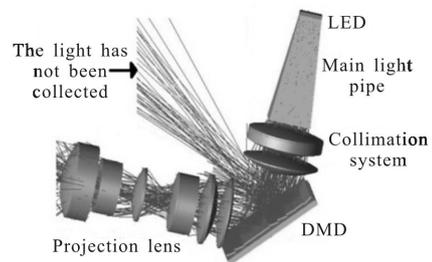
根据以上计算和仿真得到的相关参数,在 Tracepro 中建立 LED、导光管、准直透镜组、DMD 芯片和投影透镜的模型,其中 LED 光源根据实测的光通量和光谱数据设定,其他元件也根据实际情况设置反射率、折射率和透射率等参数,系统的整体体积控制在 $100\text{ mm}\times 80\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 以内,经过反复调整,得到 DLP 微型投影系统的光路图,如图 7(a)和图 7(b)所示。

由前文的分析可知,当 DMD 上的微镜处于“OFF”态时,光线将被 CPC 收集起来,重新回到主光管中,实现光线的循环利用,提高光能利用率。在图 7(a)和图 7(b)中,将 DMD 芯片上 50%的微镜调节到“OFF”态(-12°),50%的微镜调节到“ON”态($+12^\circ$),对无收集光管和有收集光管两种情况分别仿真,从图 7(a)中可以看到,在没有收集光管的情况下,有部分光线没有被微镜反射到投影镜头上而是被浪费掉

了;而在图 7(b)中,同样有部分光线没有被微镜反射到投影镜头上,但是它们被反射到 CPC 的入射端,被 CPC 收集起来,通过弯型光管重新回到主光管中,弯型光管中可以明显看到有光线传输。

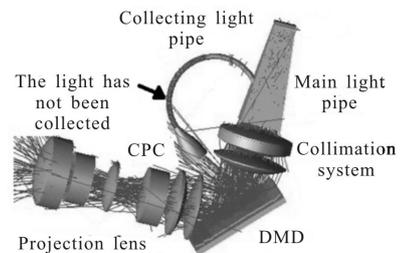
将光屏放置在距离微投影仪 1 m 远处,DMD 芯片上 50%微镜处于“OFF”态,50%微镜处于“ON”态,仿真无收集光管和有收集光管两种情况下光屏上照度分布,如图 7(c)和 7(d)所示。从图中可以得到光屏上接收到的光通量分别为 232.31 lm 和 187.58 lm,微投影仪整机的光能利用率分别为 30.728% 和 24.81%,相比无收集光管,整机的光效提高了 5.9%。

将处于 DMD 上“OFF”态的微镜数量从 0%变化到 100%,每隔 10 个百分点仿真一次有收集光管和无收集光管状态,得到不同状态下的投影屏幕上接收的光能,拟合成曲线如图 7(e)所示。从图中可以看出,相比无收集光管的情况,收集光管提高系统光能利用率的能力随着处于“OFF”态微镜数量的先增加再减小,当处于“OFF”态微镜数量为 50%时,收集光管提高整机的光效达到最大,为 5.19%。



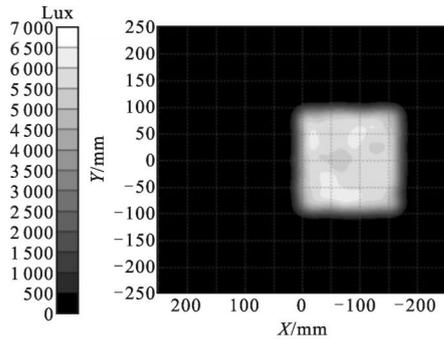
(a) 50%微镜处于“OFF”态,无收集光管的光路图

(a) Optical pathway of half micromirrors in "OFF" state with no collecting light pipe



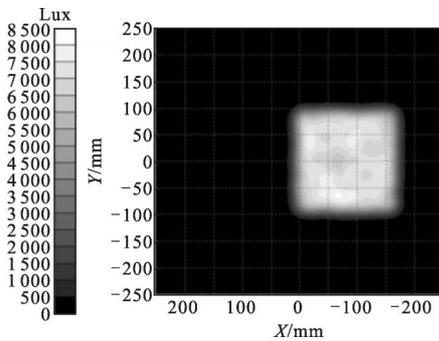
(b) 50%微镜处于“OFF”态,有收集光管的光路图

(b) Optical pathway of half micromirrors in "OFF" state with collecting light pipe



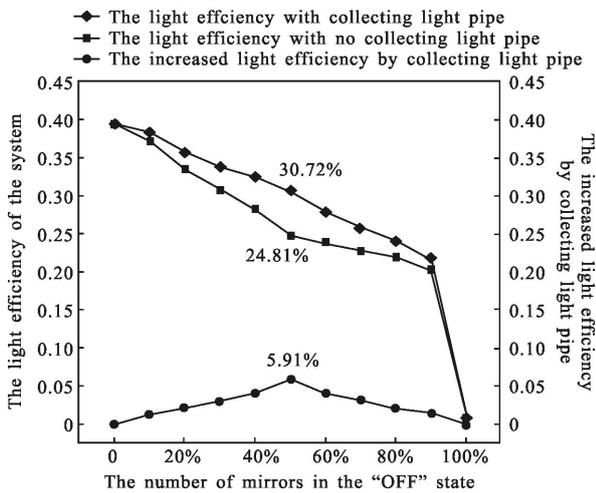
Total luminous flux: 187.58 lm; light efficiency: 24.81%

(c) 50% 微镜处于“OFF”态,无收集光管时投影屏幕上的照度分布
(c) Illuminance distribution of half micromirrors in "OFF" state with no collecting light pipe



Total luminous flux: 232.31 lm; light efficiency: 30.728%

(d) 50% 微镜处于“OFF”态,有收集光管时投影屏幕上的照度分布
(d) Illuminance distribution of half micromirrors in "OFF" state with collecting light pipe



(e) 在有或无收集光管的情况下,“OFF”态微镜数量与系统光效和导光管增加的光效的曲线图

(e) With having and not having the collecting light pipe, the graph between the number of mirrors in the "OFF" state and the light efficiency of the system and increased by the light pipe

图 7 仿真与结果分析

Fig.7 Simulation and result analysis

7 结 论

文中提出一种结构紧凑、光能利用率高的微型 DLP 投影光学系统的设计方案,该方案提出在主光管的基础上加一个弯型导光管和 CPC 来收集 DMD 芯片上微镜处于“OFF”态时反射的光线;主光管采用正置的锥形结构,并与 3 颗 LED 直接耦合。整个系统体积控制在 100 mm×80 mm×50 mm 以内。分别对有无收集光管两种情况进行仿真,仿真结果表明:随着处于“OFF”态微镜数量的增加,收集光管提高系统光能利用率的能力的先增加再减小,当 DMD 芯片上当处于“OFF”态微镜数量为 50% 时,相比无收集光管的情况,导光管提高的光能利用率最多,为 5.91%。该方案不仅可以应用到微投影仪中,而且可应用到汽车自适应前照灯系统中,为微型投影系统的发展提供了一定的参考。

参考文献:

- [1] Pan Jiuwen, Lin Shenghan. Achromatic design in the illumination system for a miniprojector with LED light source [J]. *Optics Express*, 2011, 19(17): 15750–15759.
- [2] Qiu Song, Wang Weisheng, Wang Shuxian, et al. Optical design of DLP optical engine based on LED light source [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2008, 31 (6): 1712–1715.
- [3] Rui Dawei, Lin Zulun, Qi Kangcheng, et al. Optical design in illumination system of digital light processing projector using laser and gradient-index lens [J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(1): 013004.
- [4] Wu Han, Zhu Xiangbing, Zhu Qian, et al. Optical design of adaptive front lighting system based on digital micro mirror device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (4): 955–959. (in Chinese)
- [5] Wang Cheng, Zhu Xiangbing, Hao Wenliang, et al. Research on design orinciple of automobile headlamp [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2013 (6): 23–30. (in Chinese)
- [6] Zhang Yu, Chen Chen, Liu Xiaochan, et al. Design of short-focus projection lens for LED digital projectors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (10): 2760–2764. (in Chinese)
- [7] Allen Jong-Woei Whang, Pei-Chun Li, Yi-Yung Chen, et al. Guiding light from LED array via tapered light pipe for illumination systems design [J]. *Journal of Display Technology*, 2009, 5(3): 104–108.