

基于LED和复眼透镜的自适应前照灯的光学设计

王程¹ 朱向冰¹ 田丽伟¹ 郝文良¹ 王若飞²

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 241009

摘要 针对现有自适应前照灯技术存在的照明模式少、对光线控制不精准、光能利用率低和散热难度大等缺点, 提出一种基于发光二极管(LED)和复眼透镜的自适应前照灯设计方案, 以数字微镜为核心, 利用复眼透镜在数字微镜上形成均匀且具有明暗截止线的光斑, 并用复合抛物面聚光器(CPC)和弯形导光管收集多余的光线重新利用, 通过控制数字微镜上微镜的翻转位置和翻转频率实现欧洲经济委员会(ECE)标准中“近光(Passing beam)”的4种照明模式。仿真结果表明:4种照明模式的平均光能利用率为43.62%, 配光结果满足ECE R123标准, 数字微镜上有59.46%的微镜工作且没有微镜一直处于“OFF”态, 光能利用率高, 散热难度小。

关键词 光学设计; 自适应前照灯; 发光二极管; 数字微镜; 复眼透镜; 光能利用率

中图分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.042204

Optical Design of the Adaptive Front Lighting System Based on the LED and the Fly's-Eye Lens

Wang Cheng¹ Zhu Xiangbing¹ Tian Liwei¹ Hao Wenliang¹ Wang Ruofei²

¹Department of Physics, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241000, China

²Chery New Energy Automotive Technology Co., Ltd., Wuhu, Anhui 241009, China

Abstract Some limitations are involved in traditional adaptive front lighting system (AFS) such as fewer modes, low control accurateness, low light efficiency and hard heat dissipation, etc. This paper proposes an optical scheme of the AFS based on the LED and the fly's-eye lens. Using a fly's-eye lens, the uniform facula with a cut-off line can be achieved in the digital micro mirror (DMD). And the compound parabolic concentrator (CPC) and the bent light pipe are used to collect extra light. By controlling the flip position and the flip frequency of the mirrors of the DMD, the passing beam can be achieved. The simulation results show that the average light efficiency of this system is 43.62%. The results of the light distribution can meet the requirements of the ECE R123. In the DMD, 59.46% mirrors work and none of the mirrors is in the “OFF” status. Moreover, this system enjoys the features of high light efficiency and less heat dissipation.

Key words optical design; adaptive front lighting system; light emitting diode; digital micro mirror; fly's-eye lens; light efficiency

OCIS codes 220.2945; 220.4298; 220.4830

1 引言

随着时代的进步, 汽车前照灯正朝着两个方向发展: 一是LED取代传统光源, 二是自适应前照灯系统(AFS)。LED与传统前照灯光源相比, 具有寿命长、环保节能、启动快、设计自由度高等一系列优点^[1-4]; 自适应前照灯系统能够根据周边环境的变化自动地调节前照灯的光型、光束照射的远近以及亮度的强弱, 提供更适合的照明范围、照明距离和照明角度, 提高行车安全^[5]。

在LED取代传统前照灯光源中, 前人做了很多的研究, 如Ge等^[6-7]提出了基于单颗LED的近光灯和远光灯; Hsieh等^[8-9]分别提出基于多颗LED的近光灯。现有的自适应前照灯有三种实现方案: 1) 动态AFS^[10],

收稿日期: 2014-10-13; 收到修改稿日期: 2014-12-05; 网络出版日期: 2015-03-18

基金项目: 安徽省科技攻关项目(1301022058)

作者简介: 王程(1989—), 男, 硕士研究生, 主要从事汽车前照灯方面的研究。E-mail: cheng0808066@163.com

导师简介: 朱向冰(1973—), 男, 教授, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: asd05tx@126.com(通信联系人)

但实现得照明模式少;2)静态LED点阵式AFS^[11],但该方案对光线控制不够精准;3)数字微镜(DMD)AFS^[12-13],但该方案存在光能利用率低、散热难度大等缺陷。

本文提出一种基于LED和复眼透镜的自适应前照灯设计方案,该方案以数字微镜为核心,利用复眼透镜在数字微镜上形成均匀且具有明暗截止线的光斑,并用复合抛物面聚光器(CPC)和弯形导光管收集多余的光线重新利用。通过控制数字微镜上微镜的翻转位置和翻转频率实现欧洲经济委员会(ECE)标准中“近光(Passing beam)”的4种照明模式,光能利用率高,散热难度小。

2 整体方案

数字微镜元件(DMD)在一块芯片上集成了数以百万的微镜,每个微镜都可以在 $\pm 12^\circ$ (或 $\pm 10^\circ$)位置独立且高速的翻转。在传统利用DMD的光学系统中,如DMD投影仪,先在DMD上形成均匀的矩形光斑,然后通过投影透镜将矩形光斑投射到屏幕上,最后通过调节数字微镜上微镜的翻转频率来控制屏幕上不同点照度值。处于“ON”态($+12^\circ$)微镜将光线反射到屏幕上,处于“OFF”态的微镜将光线反射到吸收体上。通过调节DMD上翻转频率就可以控制屏幕上和各点照度值,例如,当某个微镜处于“ON”态($+12^\circ$)时,屏幕上对应点的照度值是10lux,如果该微镜在单位时间内快速翻转2次,屏幕上点的照度值就变为5 lux。

但是对于自适应前照灯系统,在ECE R123标准中“近光”有4种不同的照明类型,分别是Class C(传统近光)、Class V(城镇道路)、Class E(高速)和Class W(恶劣天气),这4种类型的照明模式都需要在配光屏幕上形成一个具有明暗截止线的光斑,而不是矩形的,如图1(a)所示,如果先在DMD上形成矩形光斑就会造成图1(b)中阴影部分的微镜一直处于“OFF”态,大约有10%的光能被浪费;另外其他微镜在 $\pm 12^\circ$ 翻转时也会造成光能的浪费,所以使光效最高的方案是保持最终配光屏幕上光斑形状和DMD上形成的光斑形状一致。

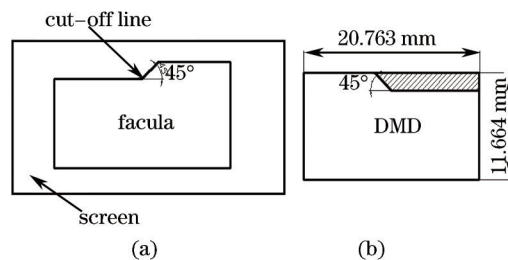


图1 屏幕和DMD上的光斑图

Fig.1 Facula in the screen and the DMD

本课题组所提出的方案是先在DMD上形成均匀的具有明暗截止线的光斑,如图2(a)所示,并且用CPC和弯形导光管收集微镜“OFF”态反射的光线重新利用。图2(b)是整体光路图,首先用抛物面反射器和半圆形透镜将光线准直,其次用双排复眼透镜在DMD上形成均匀且具有明暗截止线的光斑,复眼透镜由三种不同形状的小透镜组成。当微镜处于“ON”态时,光线被反射到屏幕上,当微镜处于“OFF”态时,光线被CPC和弯形导光管收集重新投射到屏幕右下方。该光路由准直部分、匀光部分和光线收集三部分组成。

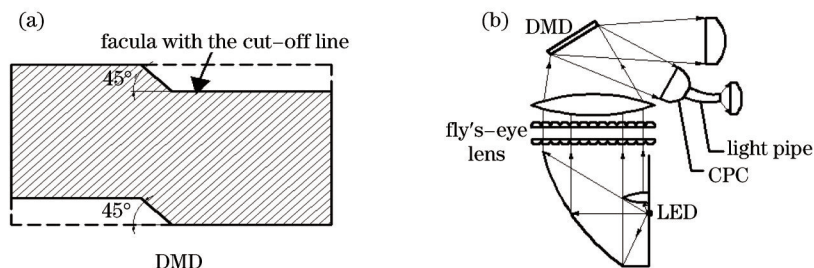


图2 (a) DMD上的光斑; (b)整体光路图

Fig.2 (a) Facula of the DMD; (b) profile of the system

3 车灯设计

3.1 准直设计

准直系统由LED、抛物面反射器、半圆形准直透镜组成,如图3所示,LED位于抛物面反射器的焦点,

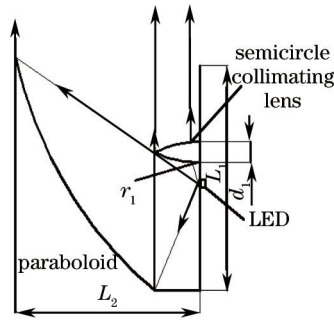


图3 准直部分

Fig.3 Collimation system

LED的半发散角为 θ_1 , $0^\circ \sim 45^\circ$ 的光线被准直透镜准直, $45^\circ \sim \theta_1$ 的光线被抛物面反射器准直。

准直透镜采用BK7材料, 折射率 $n_1 = 1.518$, 其光心和LED的距离等于它的焦距 f_1 , 焦距 f_1 、半径 r_1 和厚度 d_1 的关系为

$$f_1 = \frac{n_1 r_1^2}{(n_1 - 1)[2n_1 r_1 + (n_1 - 1)d_1]}, \quad (1)$$

准直透镜的厚度 d_1 、孔径 D_1 和半径 r_1 满足

$$\left(\frac{D_1}{2}\right)^2 + \left(r_1 - \frac{d_1}{2}\right)^2 = r_1^2, \quad (2)$$

而 D_1 和 f_1 之间又满足

$$\frac{D_1}{2} = f_1 \times \tan 45^\circ. \quad (3)$$

由(1)~(3)式知, 在透镜材料选定的情况下, 对于任意的 r_1 , 有唯一的 D_1 、 d_1 和 f_1 , 只需要根据反射器的尺寸选择合适的 r_1 即可, 见表1。

表1 准直部分相关参数值(单位:mm)

Table 1 Parameters of the collimation system(unit:mm)

Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
L_1	48	f_1	10.1	D_1	12.8
L_2	48	r_1	20	d_1	5

3.2 匀光设计

匀光器件采用双排复眼透镜, 传统的复眼透镜由矩形或正六边形的小透镜组成, 所成光斑为矩形或正六边形, 小透镜的数量越多, 光斑均匀性越好且形状越小。方案中的双排复眼透镜需在DMD上形成具有明暗截止线的光斑, 每排透镜阵列都由三种不同形状的小透镜的组成, 共10行×6列小透镜, 如图4所示, 其中A是第1行小透镜, B是2~9行小透镜, C是第10行小透镜。每个小透镜单元的两个折射面分别是平面和曲率半径为 r_2 的球面, 采用聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)材料, 折射率 $n_2 = 1.49$, 焦距 $f_2 = \frac{r_2}{n_2 - 1}$, 前排和后排透

镜的间距 $d_2 = f_2$; 为了与DMD匹配(DMD的长宽比为16:9), 小透镜长和较短的宽的比值要大于16:9, 这样

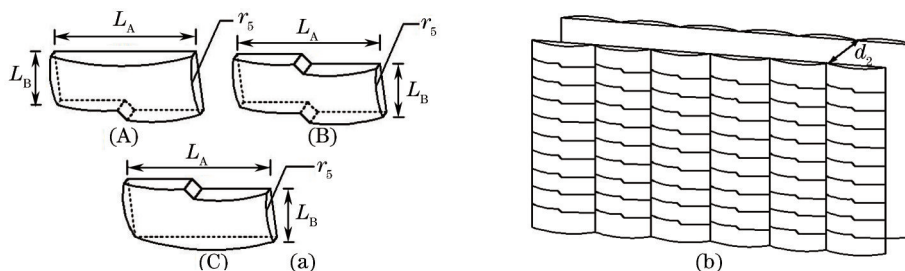


图4 (a)三种不同形状小透镜;(b)10×6双排复眼透镜

Fig.4 (a) Three lenses with different shapes; (b) 10×6 double row fly's-eye lenses

才能保证光斑面积小于 DMD 面积;小透镜中倾斜部分与水平方向的夹角为 45° ,相关参数值见表 2。

表 2 匀光部分相关参数值(单位: mm)

Table 2 Parameters of the uniform light(unit: mm)

Parameter	Value	Parameter	Value	Parameter	Value
L_A	16	r_2	13	f_2	26.5
L_B	5	d_2	26.5		

3.3 光线收集设计

仅用 DMD 反射到屏幕上的光斑形状并不能达到 ECE 标准中要求的光斑形状,因为屏幕右下方没有光线到达,而 ECE 标准中规定此区域有照度,但没有规定最小值,所以只要使屏幕右下方有照度即可满足标准。又考虑到当 DMD 上的微镜处于“OFF”态的位置时,光线不能被反射到屏幕上,被浪费掉了,方案中用一个弯形导光管和 CPC 将处于“OFF”态的光线收集起来,并将光线投向屏幕的右下方。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 ,那么 CPC 的最大收集角 θ_{\max} 满足

$$\sin \theta_{\max} = \frac{a}{b}, \quad (4)$$

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_3 为

$$f_3 = a(1 + \sin \theta_{\max}), \quad (5)$$

CPC 的长度 L 为

$$L = \frac{a(1 + \sin \theta_{\max}) \cos \theta_{\max}}{\sin^2 \theta_{\max}} = \frac{f_3 \cos \theta_{\max}}{\sin^2 \theta_{\max}}. \quad (6)$$

根据图 5 可以推出,CPC 应与水平方向成 48° 放置,入射端半径 $b = 10$ mm,CPC 的最大收集角 $\theta_{\max} = 30^\circ$, $a = 5$ mm, $f = 7.5$ mm, $L = 25.98$ mm。导光管类似光纤,在弯曲的时候会发生弯曲损耗,弯曲损耗与弯曲半径成反比,弯曲半径 R 越大,弯曲损耗越少,因此在前照灯尺寸允许的情况下,弯曲半径越大越好,这里 R 取 18 mm。

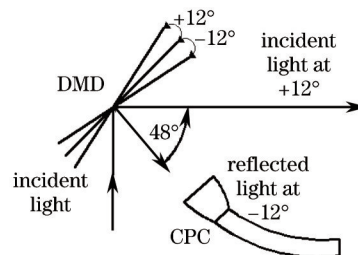


图 5 光线收集示意图

Fig.5 Diagram of collection of the light

3.4 4 种照明模式的实现

Class C(传统近光)、Class V(城镇道路)、Class E(高速)和 Class W(恶劣天气)4 种照明模式的不同之处是:1)每种照明模式在特殊点和特殊区域的照度不同;2)每种照明模式的截止线和水平线(H线)的距离不同。在 ECE 标准中,用角度表示距离,Class C、Class V、Class E 和 Class W 与 H 线的距离分别是 -0.57° 、 -1.3° 、 -0.23° 和 -0.23° 。转化成实际距离,

$$X = 25000 \times \tan \alpha, \quad (7)$$

其中 X 为实际距离, α 表示对应角度。

通过控制数字微镜上微镜的翻转位置和翻转频率可以控制配光屏幕上光斑各点的照度值,就可以实现 4 种照明模式。会聚透镜的参数值根据已确定的其他参数值适当调节即可。

4 仿真与结果分析

LED 选用 CREE 的 MK-R 型,DMD 选用 dlp7000 型,长和宽分别为 20.763 mm 和 11.664 mm,可以在 $\pm 12^\circ$ 位置翻转,根据相关参数,在光学软件 TracePro 中建立自适应前照灯模型,如图 6 所示。元件的光学参数

设置为:准直部分的抛物面反射器的反射率为98%,半圆形准直透镜透射率为87%,复眼透镜的透射率为75.69%,DMD的反射率为88%,会聚透镜的透射率为87%。经过光线追迹后,得到DMD上的光斑图和配光屏幕上4种照明模式的光型图,见图7。

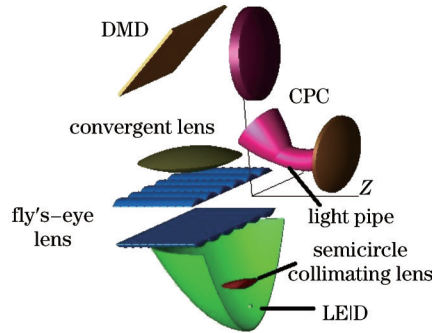


图6 自适应前照灯建模

Fig.6 Modeling of the AFS

在图7中,(a)为DMD上形成的均匀且具有明暗截止线的光斑,图7(a)中的光斑长宽分别为18 mm和8 mm,比值大于16:9,满足要求,数字微镜上工作的微镜有: $\frac{18 \times 8}{20.763 \times 11.664} \times 100\% = 59.46\%$ 。DMD上没有微镜一直处于“OFF”态,与直接在DMD上形成矩形光斑相比,提高了光利用率,降低了散热难度。图7(b)~(d)分别为Class C(传统近光)光型图、Class V(城镇道路)光型图、Class E(高速)光型图和Class W(恶劣天气)光型图。从图7(b)~(d)可以看出,Class C、Class V、Class E和Class W四种模式的光能利用率分别为:44.02%、44.65%、45.24%、40.57%,平均值为43.62%。相对于刘旖等^[14]提出的DMD光学系统33%的光效和Rui等^[15]提出的DMD光学系统37.9%的光效,系统光能利用率有一定的提升。

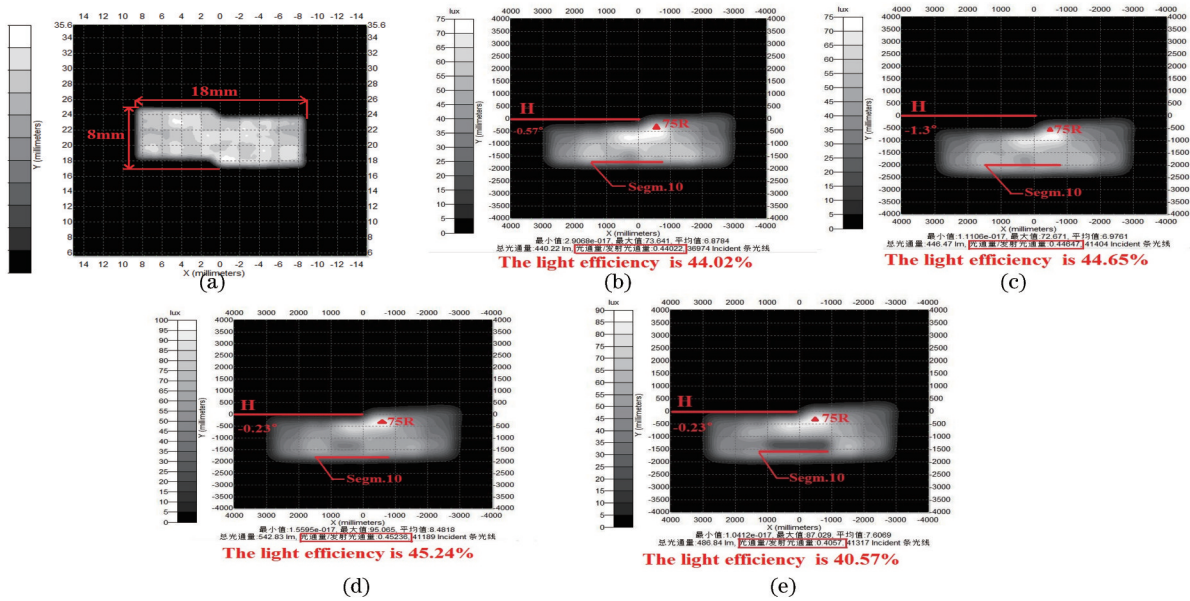


图7 系统仿真图。(a)DMD上的光斑图;(b)Class C仿真图;(c)Class V仿真图;(d)Class E仿真图;(e)Class W仿真图

Fig.7 Simulation of the system.(a)Facula of the DMD;(b)simulation of the Class C;(c)simulation of the Class V;

(d) simulation of the Class E; (e) simulation of the Class W

4种模式与H线的距离不同,分别是248、567、100、100 mm。4种模式的特殊点和特殊区域的照度值也不同。特殊点如75R点,在Class C模式下是74.1 lux;在Class V模式下是73.3 lux;在Class E和Class W模式下分别是98.5 lux和88.4 lux。这是因为在Class E或Class W模式下,汽车速度很快或前方能见度较低,应当加强前方的照明视野,给司机足够的反应时间,保证行车安全。特殊区域如Segm.10,在Class C、Class V和Class E模式下,Segm.10以及Segm.10以下点的照度最大值小于14lux;而在Class W模式下,Segm.10以及Segm.10以下点的照度最大值小于8 lux,这是因为在恶劣天气时,特别是雨雪天气时,地面的积水会将光

线反射到司机的眼中,造成眩目,不利于行车安全,所以要降低汽车前方区域的照度,减少眩光。表3为仿真结果与标准值对比。

表3 系统仿真结果(单位:lux)
Table 3 Simulation result of the system(unit:lux)

Test Points	Passing beam							
	Class C		Class V		Class E		Class W	
	Required	Simulation	Required	Simulation	Required	Simulation	Required	Simulation
B50L	≤ 0.4	0.3	≤ 0.4	0.27	≤ 0.7	0.58	≤ 0.7	0.55
HV	≤ 0.4	0.28	≤ 0.4	0.23	—	—	—	—
Zone III	≤ 0.7	0.56	≤ 1	0.42	≤ 1	0.67	≤ 1	0.74
50R	—	—	≥ 6	27.6	—	—	—	—
75R	≥ 12	44.1	—	—	≥ 18	68.5	≥ 24	62.4
50V	≥ 6	33.3	≥ 6	38.5	≥ 12	56.2	≥ 12	50.9
50L	[4.2, 15]	11.3	[4.2, 15]	9.9	≥ 8	25.4	≥ 8	24.2
25LL	≥ 1.4	2.7	≥ 1	2.1	≥ 1.4	3.9	≥ 4	5.3
25RR	≥ 1.4	3.7	≥ 1	2.3	≥ 1.4	2.6	≥ 4	5.9
Segment.10 and below	≤ 14	10.3	≤ 14	12.1	≤ 14	11.9	≤ 8	5.2
Emax	[20, 50]	44.3	[10, 50]	43.2	[20,90]	69.8	[35, 80]	64.4

5 结 论

设计了一款基于LED和复眼透镜的自适应前照灯,利用双排复眼透镜在DMD上形成一个均匀且具有明暗截止线的光斑,并且用CPC和弯形导光管收集微镜“OFF”态时反射的光线,再将光线投射到屏幕的右下方,最后通过调节数字微镜上微镜的翻转位置和翻转频率实现“近光(Passing beam)”4种照明模式,仿真结果表明:4种照明模式的平均光能利用率为43.62%,DMD中有59.46%的微镜工作且没有微镜一直处于“OFF”态,配光结果符合ECE R123标准,光能利用率高,散热难度小。

参 考 文 献

- Xu Daisheng, Chen Xiao, Zhu Xiang, *et al.*. A dimming lighting source based on cold and warm white LEDs [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0123004.
徐代升, 陈晓, 朱翔, 等. 基于冷暖白光LED的可调色温可调光照明光源[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0123004.
- Lai Liping, Zhuang Qiren, Liang Dejuan, *et al.*. Investigation of uniform illumination of the near-field on the lateral panels using LED projectors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0322002.
赖丽萍, 庄其仁, 梁德娟, 等. 基于近场侧面均匀照明的LED投射器研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0322002.
- Yin Luqiao, Weng Fei, Song Peng, *et al.*. Thermal interact effects of LED chip with YAG phosphor layer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0323002.
殷录桥, 翁菲, 宋朋, 等. LED芯片与TAG荧光粉的相互热作用[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0323002.
- Cheng Zhiming, Zeng Ping, Zhang Zhihai, *et al.*. Rsearch on multi-direction collimation beam on the plane parallel with LED lighting plane [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1008001.
程治明, 曾平, 张志海, 等. 与LED发光面平行平面上多向准直光束的研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1008001.
- Peña-García A, Peña P, Espín A, *et al.*. Impact of adaptive front-lighting systems (AFS) on road safety: Evidences and open points [J]. *Safety Science*, 2012, 50(4): 945-949.
- A Ge, W Wang, Z Du, *et al.*. High-energy-efficiency optical system for an LED-based headlamp architecture [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(34): 8318-8323.
- Ge A, Wang W, Du Z, *et al.* Design of an LED-based compound optical system for a driving beam system [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(12): 2688-2693.
- C C Hsieh, T H Li, C C Hung. Modular design of the LED vehicle projector headlamp system [J]. *Appl Opt*, 2013, 52(21): 5221-5229.

- 9 B Y Qing, Y H Qiao. Research on multi-LED headlamp lighting system adjustment mechanism design-based on besturn B70 LED headlamp design [C]. Mechatronic Science, IEEE, 2011: 684-686.
- 10 Luis Sampedro Diaz Christian Heider. System and Method for Electronic Adaptive Front-Lighting [P] USA : 12/392, 060.
- 11 X Zhu, Q Zhu, H Wu, *et al.*. Optical design of LED-based automotive headlamps [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 45: 262-266.
- 12 M S Huang, C C Hung, Y C Fang, *et al.*. Optical design and optimization of light emitting diode automotive head light with digital micromirror device light emitting diode [J]. Optik- International Journal for Light and Electron Optics, 2010, 121(10): 944-952.
- 13 C C Hung, Y C Fang, N S Huang, *et al.*. Optical design of automotive headlight system incorporating digital micromirror device [J]. Appl Opt, 2010, 49(22): 4182-4187.
- 14 Liu Yi, Lin Zulun, Qi Kangcheng, *et al.*. The illumination system design of one chip DLP optical engine based on LED light source based on LED light source [J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(9): 99-103.
刘 旂, 林祖伦, 祁康成, 等. 基于LED光源的单片式DLP照明系统设计[J]. 光电工程, 2011, 38(9): 99-103.
- 15 Dawei Rui, Zulun Lin, Kangcheng Qi, *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.

栏目编辑: 韩 峰