

文章编号:1002-2082 (2020) 01-0156-07

基于二维 MEMS 器件的微型投影技术

江 伦¹, 宋志化^{1,2}, 安 岩¹

(1. 长春理工大学 空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 利用微机电器件的二维偏转特性, 以激光二极管为光源, 通过二者结合来实现激光扫描微机电器件的投影系统。和传统微型投影技术相比, 基于微机电器件的微型投影显示系统具有尺寸小、能耗低、图像对比度高等优点。根据元器件特性, 对激光光束进行准直、汇聚、匀化处理, 并借助二维微机电器件的反射偏转特性设计了物镜后扫描系统, 再对扫描方法、像素排列等进行优化分析。设计结果显示: 系统像面尺寸为 104 mm×59 mm, 包含 80% 能量时单像素点几何半径在 186 μm 以内, 系统分辨率可以达到 558×314 pixel, 刷新率为 30 Hz。设计的投影系统可用在车载平视显示系统等小型投影系统中, 也可为类似设计提供参考。

关键词: 微振镜; 激光投影; 成像系统; 光束整形; 车载平显; 栅式扫描

中图分类号: TN 27

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202041.0105001](https://doi.org/10.5768/JAO202041.0105001)

Micro-projection technology based on 2D MEMS device

JIANG Lun¹, SONG Zhihua^{1,2}, AN Yan¹

(1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aero and Ground Laser Communication Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China ; 2. College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The laser scanning micro electromechanical device projection system is realized by the two-dimensional deflection characteristics of micro electromechanical device and the laser diode as the light source. Compared with the traditional micro-projection technology, the micro-projection display system based on the micro electromechanical device has the advantages of small size, low energy consumption and high image contrast. According to the characteristics of the components, the laser beam was collimated, concentrated and homogenized. The post-scanning system of the objective lens was designed by using the reflection deflection characteristics of two-dimensional micro electromechanical device, and the scanning methods as well as the pixel arrangement were optimally analyzed. The design results show that the size of the image plane is 104mm×59mm, and the single-pixel point geometric radius is within 186 μm when 80% energy is included. The resolution of the system can reach 558×314 pixel, and the refresh rate is 30Hz. The design results can be used in the small projection systems such as vehicle head-up display system, and can also provide reference for similar designs in the future.

Key words: micro vibrating mirror; laser projection; imaging system; beam shaping; head-up display; grid-type scanning

收稿日期:2019-03-29; 修回日期:2019-06-18

基金项目:国家自然科学基金 (61701045);吉林省优秀青年人才基金 (20170520163JH);长春理工大学创新基金 (2016•[03]);长春市科技发展计划资助项目 (18DY016)

作者简介:江伦 (1958-), 男, 博士, 副教授, 主要从事空间激光通信方面的研究。E-mail: jlcjomp@163.com

通信作者:宋志化 (1995-), 男, 硕士, 主要从事光学系统设计方面的研究。Email: zhihuamail@foxmail.com

引言

微型投影技术主要是指采用发光二极管 (LED, light emitting diode) 为光源, 以液晶显示器 (LCD, liquid crystal display) 或数字微镜元件 (DMD, digital micromirror device) 作为显示单元并借助投影系统光路成像的一种现代显示技术, 现已有许多方面的研究成果并实现了商业化^[1]。微机电系统 (MEMS, micro electro mechanical system) 便是 DMD 的主要组成元件^[2], 但在 DMD 中使用的是二维偏转 MEMS。随着超精密加工技术的进一步发展, 现有 MEMS 扫描振镜可实现二维偏转并可进行投影显示^[3-6]。激光二极管 (LD, laser diode) 与 LED 相比单色性更好、光功率高, 可实现亮度高、色域广、节能的图像显示。虽然 LD 方向性较好, 但有一定发散角, 光强呈高斯分布, 使用在微型投影领域需要进行光束整形处理。车载平视显示系统 (HUD, head up display) 可将导航图像, 车辆行驶状况等信息显示在挡风玻璃上, 近年来发展迅速, 已有多方面研究成果^[7] 在部分车型上得到了应用^[8]。然而大部分都存在结构复杂, 电能利用率不高等问题^[9]。

随着激光二极管、MEMS 扫描振镜等器件性能的不断提高, 发展日益成熟, 二维 MEMS 器件可用作激光雷达系统^[10], 也有学者提出使用激光扫描 MEMS 投影系统作为 HUD 系统的显示器件^[11], 图像被逐个像素点投射在显示区域, 实现以时间为顺序的图像信号转变为二维目视图像, 具有尺寸小、结构简单、电效率高等优点, 然而鲜有关于此结构的光学部分系统设计。本文依据现有激光二极管光源的参数特性, MEMS 扫描振镜性能作为光学系统初始条件, 采用物镜后扫描系统, 设计了光束成形结构, 通过全视场点列图, 几何圈入能量等参数评估投影画面性能。设计结果可用在小型投影设备, 例如 HUD 中, 也可为类似光学系统设计提供参考。

1 投影技术对比分析

基于 LCD 投影技术的显示器件是液晶面板, 原理是用电信号控制液晶单元的透过率实现成像, 属于投射式。像素需要点亮的部分透过率较高, 不需要点亮的部分透过率低, 但光不能被完全阻挡, 这就是为什么液晶显示器不能显示完美

的黑色, 表现在 HUD 上面就是背景不能做到完全透明, 图像对比度低, 如图 1(a) 所示。基于 DMD 投影技术的显示器件是微振镜, 用电信号控制成千上万个振镜反射入射光线来显示所需要的像素, 属于反射式。像素需要点亮的部分光线能到达, 不需要点亮的部分光线被反射到视野之外或被阻挡, 因此在 HUD 中背景可以做到透明, 对比度较高, 如图 1(b) 所示^[12-13]。以上两种显示技术中无论多少像素需要被点亮, 光源都必须照射到整个像素阵列 (LCD 或 DMD) 上, 光能很大一部分都被浪费了, 电能利用率低。

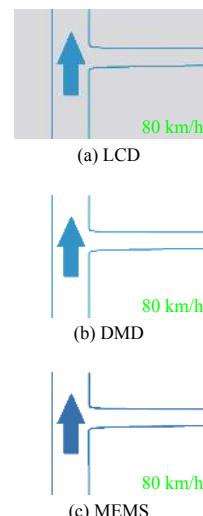


图 1 不同显示元件的显示效果对比示意图

Fig. 1 Comparison of display effects with different display elements

基于 MEMS 器件的车载平视显示系统工作原理如图 2 所示。它也是属于反射式, 背景能做到完全透明, 由于激光二极管的单色性好, 可以实现更广的色域显示, 如图 1(c) 所示。同时在激光扫描 MEMS 投影中, 仅在像素需要被点亮的部分, 激光二极管才被施以电脉冲开始工作, 大大减小了电能需求。由于该结构相对比较简单, 投影系统的尺寸也能做到更小。国内外有学者进行过类似的设计研究, 例如, 李昭等^[14] 使用两片一维的扫描振镜, 投影所得为李萨如图形; 林俊国等^[15] 利用 MEMS 设计了激光扫描视网膜投影显示系统。以上系统大都存在结构复杂, 图像分辨率不理想的情况。

激光扫描 MEMS 投影系统克服了传统投影系统的部分缺点, 有发展潜力, 技术性能对比如表 1 所示。

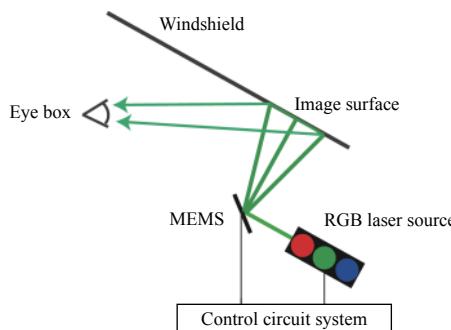


图 2 基于 MEMS 器件的车载平视显示器工作原理

Fig. 2 Schematic diagram of working principle of vehicle head-up display based on MEMS devices

表 1 不同投影系统性能对比

Table 1 Comparison of projection technology performance

投影技术参数	LCD	DMD	MEMS
光源实现方式	透射式	反射式	反射式
投影亮度	低	中	中
图像色域	中	中	高
图像对比度	中	高	高
电能利用率	中	中	高

2 投影系统光学设计

2.1 设计分析

根据产品调研结果, 确定光学系统初始参数。首先选择发光亮度满足要求的激光二极管, 根据激光二极管的性能参数来决定光学系统的光源类型, 以便后续的整形处理。确定 MEMS 器件的相关性能指标, 例如 MEMS 器件镜面大小, 最大扫描角度、扫描频率等。表 2 为本系统拟采用欧司朗公司的 PL-520B 激光光源, OPUS 公司的 OP-6200MEMS 器件的基本参数, 图 3 为元器件照片。

表 2 激光光源和 MEMS 器件的基本参数

Table 2 Basic parameters of laser source and MEMS device

激光光源		MEMS 器件	
参数名称	指标	参数名称	指标
光场类型	高斯	反射镜尺寸/mm	1
横向发散角/(°)	25(max)	扫描角度/(°)	±22(快轴) ±12(慢轴)
纵向发散角/(°)	7.5(max)	扫描频率/kHz	18.5/快轴
光输出功率/mW	80	扫描频率	可控/慢轴
调制频率/MHz	100	扫描模式	栅式扫描
包装尺寸/mm	3.1×9.7	包装尺寸/mm	4.8×8

从表 2 中可看出, 激光二极管封装尺寸小, 出射光束发散角也较小, 光场类型为高斯模式, 同时

由于横向、纵向发散角不同, 出射光束横截面为椭圆形, 这都给激光光束的直接投影应用带来困难。二维 MEMS 器件采用栅式扫描, 高速轴通过脉冲宽度调制(PWM, pulse width modulation)电压信号驱动, 低速轴可由特定电压波形控制运动轨迹。镜面尺寸较小, 激光光束需要尽可能多地入射到此镜面上, 又由于技术限制, 慢轴扫描角度和扫描速度并不相同, 设计时需要考虑这些限制。综上所述, 设计光学系统时需要将激光二极管的光束和 MEMS 器件相匹配, 以提高光束利用率, 同时合理利用 MEMS 器件的偏转特性, 达到最好的显示效果。



图 3 激光光源和 MEMS 器件照片

Fig. 3 Photos of laser source and MEMS device

2.2 设计方法

在以上初始条件约束下, 为了满足激光扫描 MEMS 投影系统要求, 本文设计了绿光的整形、汇聚及准直光束的光学系统准直端结构, 保证了入射到 MEMS 器件的光斑尺寸在 1 mm 以内, 具体结构如图 4 所示。系统包含 3 片透镜, 分别为双锥面透镜, 偶次非球面透镜, 双锥面透镜, 投影距离为 100 mm。优化过程是: 首先约束激光光源快轴的发散角, 使出射面为圆形, 再利用非球面透镜进行缩束, 在合适距离处放置最后一片双锥面透镜使光束平行出射, 优化过程中为便于后期组装第一面和最后一面为平面, 保证玻璃、空气厚度适中以便于加工, 用 DMLT 操作数约束像面几何半径, REAX、REAY、RSCH 等操作数约束像面坐标; RAID 操作数约束出射光束发散角。设计过程中 MEMS 用反射镜代替, 始终保证像面尺寸小于 MEMS 的尺寸。对应的像面点列图如图 4 所示。从图 4 可见, 光强分布较为均匀, 而且近似为圆

形。系统的能量分布图如图 6 所示。从图 6 可以看出, 80% 能量集中在几何半径约为 $128 \mu\text{m}$ 的圆内, 可作为单个像素点显示。

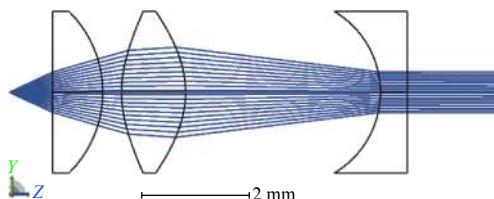


图 4 绿光光源光学系统结构

Fig. 4 Optical system structure of green light source

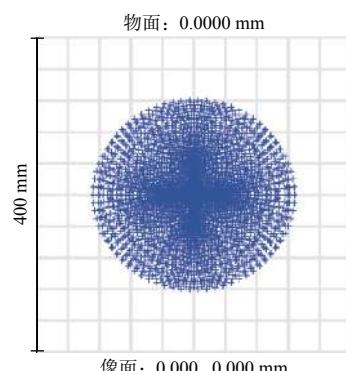


图 5 像面点列图

Fig. 5 Spot diagram of image plane

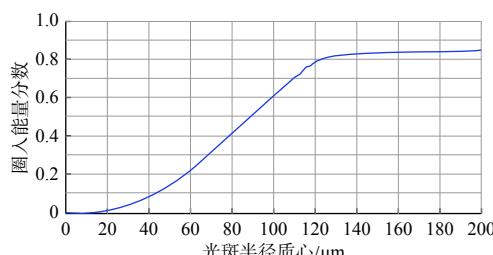


图 6 几何圈能量分布

Fig. 6 Geometric encircled energy

要实现全彩显示, 就要加入 RGB 三色激光光源。因为红光, 绿光, 蓝光的波长差别较大, 直接套用绿光的结构无法达到使用要求, 需要重新进行优化。如果采用全新的结构, 蓝光和红光光源采用的透镜都不相同, 会明显增加后期的加工成本。因此本文在现有的光学系统结构基础上, 改变光束波长, 重新优化透镜参数, 消除因光源波长改变带来的影响, 使光束质量达到要求, 但同时要尽量少改变参数。最终通过改变中间偶次非球面透镜的参数及第 2 片透镜到第 3 片透镜的距离, 实现了与绿光相似的整形效果, 大大减小了后期的

加工成本, 具有较好的实用价值。3 套光学系统出射光束尺寸一致, 再经过 3 片反射镜进行整合, 共用一路输出。RGB 三色光源光学系统结构如图 7 所示。

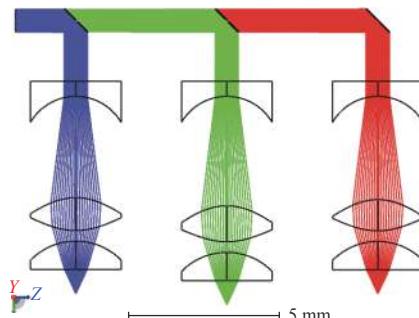


图 7 RGB 三色光源光学系统结构

Fig. 7 RGB three-color source optical system structure

将 MEMS 器件应用到系统中, 并加入偏转角度, 如图 8 所示。按照目前主流显示器的显示比例将像面尺寸比例定为 16:9, 将 MEMS 器件的横向偏转角度定为 15° , 纵向偏转角度约为 8° , 借助 MEMS 器件的二维扫描特性, 根据角度控制每个像素点的位置, 使像面形状规则。得到最终成像面的 9 点图, 如图 9 所示。

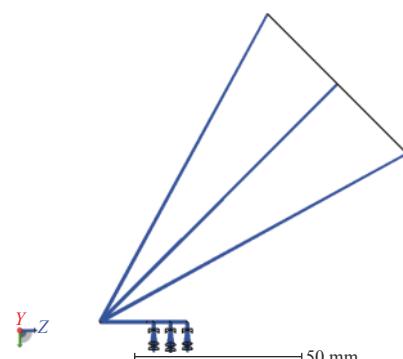


图 8 整体结构三维布局图

Fig. 8 Three-dimensional layout diagram of overall structure

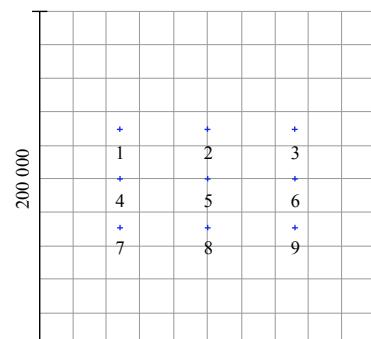


图 9 像面 9 点图(单位: μm)

Fig. 9 Nine-point diagram of image plane (unit: μm)

基于 MEMS 器件的微型投影光学系统中, 单个准直端尺寸约为 5 mm×5 mm×8 mm, 整体光学结构的投影端的尺寸约为 5 mm×10 mm×30 mm, 与基于 DMD 投影技术的光学投影端的尺寸 20 mm×50 mm×80 mm^[9] 相比大大减小。此设计利用了激光二极管和 MEMS 器件的特性, 采用物镜后扫描系统, 每种颜色的光源整形仅用 3 片透镜, 简化了投影系统的结构, 同时满足投影的要求。

3 结果验证

3.1 成像质量验证

评价成像质量主要依据 9 点图和像面像素点的大小, 通过 9 点图的坐标可得到像面尺寸, 畸变大小。表 3 为 9 点图中 9 个参考像素点的坐标位置(以标号 5 的位置为偏转原点)。

表 3 9 点图坐标位置

Table 3 Coordinate position of nine-point diagram

标号	扫描角度(x,y)/(°)	坐标(x,y)/mm
1	-13.78, -30.2	-52.2, 29.3
2	0, -30.65	0, 29.2
3	13.78, -30.2	52.2, 29.3
4	-14.28, -22.82	-52.0, 0
5	0, -22.5	0, 0
6	14.28, -22.82	52.0, 0
7	-14.5, -15.4	-52.1, -29.4
8	0, -14.3	0, -29.4
9	14.5, -15.4	52.1, -29.4

$$D_H = \left(1 - \frac{2H_3}{H_1 + H_2} \right) \times 100\% \quad (1)$$

$$D_V = \left(1 - \frac{2V_3}{V_1 + V_2} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中: D_H 、 D_V 为横向、纵向畸变; H_1 为 1 点到 3 点的距离; H_2 为 7 点到 9 点的距离; H_3 为 4 点到 6 点的距离; V_1 为 1 点到 7 点的距离; V_2 为 3 点到 9 点的距离; V_3 为 2 点到 8 点的距离。

根据(1)式和(2)式计算横向、纵向像面畸变分别为 0.2% 和 0.1%, 可见像面形状规则, 无明显畸变。同时可得像面尺寸约为 104 mm×59 mm, 可作为车载平视显示系统的显示屏, 不会遮挡驾驶员视线。

下面分析像面 9 点单个像素的大小。由于采用物镜后扫描系统像面会发生场曲, 并且 MEMS 器件的偏转也会造成像差, 最终造成中心像素点

几何尺寸最小, 形状规则, 边缘像素点会出现不同程度的变形, 几何尺寸也会变大, 9 个参考点的点列图如图 10 所示。

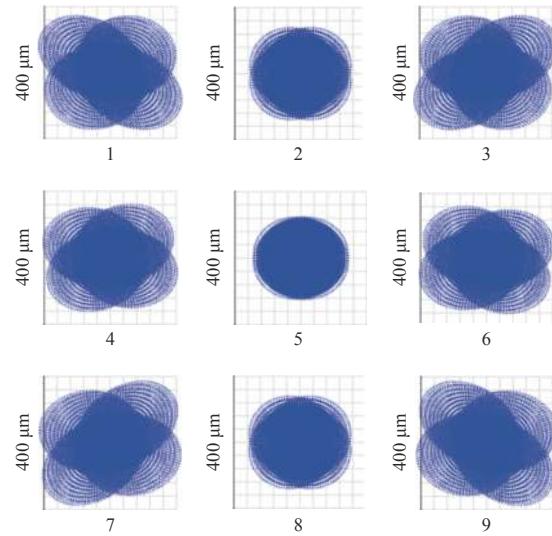


图 10 像面 9 个点的点列图

Fig. 10 Spot diagram of nine-point on image plane

3.2 扫描方式分析

为了使像素密度足够高, 同时保证每个像素点的能量得到充分利用, 并且人眼对图像边缘的亮度衰减和图像质量退化不是很敏感, 通过分析几何圈入能量, 取圈入能量为 80% 时的光斑半径为单个像素点半径, 得到的结果如表 4 所示。

表 4 9 点图的像素半径

Table 4 Pixel radius of nine-point diagram

标号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
像素尺寸/μm	184	156	184	174	156	174	186	156	186

由于 RGB 三色光源的像素半径不尽相同, 此像素半径明显比绿光单色光源时的像素半径大。由表 4 可得 7 点和 9 点像素半径最大为 186 μm, 用 0.5 d 表示。若像素是正方形排列, 如图 11(a), 横向、纵向像素间隔相同, 根据横向、纵向尺寸中可以容纳的像素个数, 便可得到像面的分辨率为 279×158 pixel。若像素是正六边形排列, 如图 11(b) 所示, 横向像素间隔是 0.5 d, 纵向像素间隔是 0.87 d, 根据横向、纵向尺寸可得到像面的实际分辨率为 558×182 pixel。由上述分析可知, 正六边形的像素排列比正方形像素的排列分辨率要高, 故此像面采用正六边形排列^[16]。因为像面尺寸比例为 16:9, 与实际分辨率比例并不匹配, 会造成图像发生变形, 后期视频信号处理时可以直接以 558×314 pixel 的分辨率输出画面。

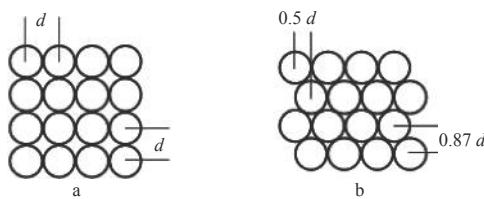


图 11 像素的两种排列方式

Fig. 11 Two ways of arranging pixels

我们分析图像所能实现的帧率。根据分辨率要求, 实现一帧画面的显示, 激光光源需要变换的频率为 $558 \times 182 = 0.1$ MHz, MEMS 器件在 2 个方向上分别需要扫描 558 次和 182 次。为了实现人眼对动态画面的要求, 每秒需要扫描 30 帧画面, 对激光光源的调制频率要求约为 3 MHz, 远小于上文列出的激光光源调制频率。MEMS 器件在 2 个方向需要的扫描频率为 16.7 kHz 和 5.5 kHz。扫描方式为栅式, 原理如图 12 所示。光束从画面左上角开始, 向右扫描一条直线, 然后迅速扫到右下行的位置, 再向左扫第二条水平线, 照此固定路径及顺序扫下去, 直到光束到达右下角。

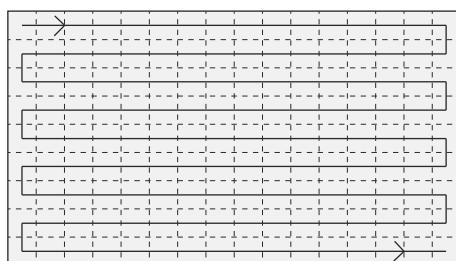


图 12 栅式扫描原理图

Fig. 12 Schematic diagram of grid-type scanning

4 设计结果

表 5 列出了光源和 MEMS 器件需要满足的最

表 5 设计结果参数

Table 5 Parameters of design results

类别	参数
光源类型	RGB三色
光源调制频率/MHz	3
MEMS扫描频率/kHz	16.7(横向), 5.5(纵向)
MEMS偏转角度/(°)	±15(横向), ±8(纵向)
MEMS扫描方式	栅式扫描
图像尺寸/mm	104×59
像素排列方式	六边形排列
图像分辨率/pixel	558×314
图像扫描帧率/Hz	30

低要求和最终实现的图像效果。如果采用更高标准的元件, 也能实现更好的效果。该投影系统分辨率超过 WQVGA 标准, 足以显示车况基本信息, 30 帧/s 的画面也可以显示动态图片, 在 HUD 中能够满足及时显示导航, 车速等信息要求。

5 结论

本文设计了用于激光扫描 MEMS 投影技术的光束成形系统, 给出了整体系统的光学结构, 并对成像结果、扫描方式进行优化分析, 最终的像面尺寸为 104 mm×59 mm, 分辨率为 558×314 pixel, 可以 30 帧/s 画面显示。和传统投影技术相比, 基于 MEMS 器件的微型投影系统尺寸更小, 功耗更低, 同时结构也相对简单, 可减少制作加工成本, 比较适合用在 HUD 系统中, 是一种新型投影方式, 具有一定的商业发展潜力。同时本系统也存在一些不足, 主要是像面尺寸偏小, 分辨率低, 造成应用范围窄, 可通过技术改进或是采用多个微型投影系统组合使用来解决。

参考文献:

- [1] MA Chao. Design and research of high-efficiency single-chip color LCD projection display[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2007. 马超. 高光效单片彩色LCD投影显示的设计与研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2007.
- [2] MA J. Advanced MEMS-based technologies and displays[J]. Displays, 2015, 37: 2-10.
- [3] HSU S T, KLOS T, DRABE C, et al. Two dimensional microscanners with large horizontal-vertical scanning frequency ratio for high resolution laser projectors[J]. SPIE, 2008, 6887: 688703-13.
- [4] TAUSCHER J, DAVIS W O, BROWN D, et al. Evolution of MEMS scanning mirrors for laser projection in compact consumer electronics[J]. SPIE, 2010, 7594: 75940A.
- [5] HE Jiahui, ZHOU Peng, YU Hunjun, et al. Reserach on large size MEMS scanning mirror driven by electromagnetic[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(1): 15-22. 何嘉辉, 周鹏, 余晖俊, 等. 电磁驱动大尺寸MEMS扫描镜的研究[J]. 光子学报, 2017, 46(1): 15-22.
- [6] RICHARD J, GIBSON G, METTING F, et al. Update on

- MEMS-based scanned beam imager[J]. SPIE, 2007, 6466: 64660J-11.
- [7] HU Yu. The research of vehicle-mounted head-up display system[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012: 13-22.
胡宇. 车载抬头显示器系统的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012: 13-22.
- [8] YANG Fei, LIN Shaohua, WU Chunjian. Application of head-up display system in automobile[J]. Light Vehicle Technology, 2013, 11(12): 24-26.
杨飞, 林绍华, 吴春建. 抬头显示系统在汽车上的应用[J]. 轻型汽车技术, 2013, 11(12): 24-26.
- [9] WANG Rui, JIANG Lun, SONG Zhihua. Optical design of ensemble head-up display system based on mini-projector[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018(11): 418-424.
王睿, 江伦, 宋志化. 基于微型投影的集成式车载平显光学系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2018(11): 418-424.
- [10] LI Qikun, QIU Qi. Design on omnidirectional optical system of lidar based on 2D MEMS mirror[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(4): 460-465.
李启坤, 邱琪. 基于2D微电子机械系统(MEMS)镜全向激光雷达光学系统设计[J]. 应用光学, 2018, 39(4): 460-465.
- [11] JAVK Yee. Laser scanned-MEMS projection system drives vehicle head-up display[J]. Electronic Engineering & Product World, 2016, 23(11): 24-26.
- Jack Yee. 激光扫描MEMS投影系统推动汽车抬头显示系统技术进步[J]. 电子产品世界, 2016, 23(11): 24-26.
- [12] GAO Xinquan, ZHANG Jingjin, YAN Hao. Comparison of image quality and performance between LCD and DMD projectors[J]. China Modren Educational Equipment, 2014(11): 38-40.
高新全, 张京津, 闫浩. LCD与DMD显示器件投影机图像效果及性能比较[J]. 中国现代教育装备, 2014(11): 38-40.
- [13] LI Weishan, CHEN Chen, ZHANG Yu, et al. Digital light processing mini-projection lens based on ZEMAX[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(6): 1121-1125.
李维善, 陈琛, 张禹, 等. 基于ZEMAX软件的DLP微型投影镜头的设计[J]. 应用光学, 2011, 32(6): 1121-1125.
- [14] LI Zhao, YUAN Weizheng, WU Meng, et al. Micro scanning mirrors with laser diode for pattern generation[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(11): 1625-1629.
李昭, 范伟政, 吴蒙, 等. 基于微扫描镜的激光投影[J]. 光子学报, 2011, 40(11): 1625-1629.
- [15] LIN Junguo, CONG Qiang, XU Chen, et al. Design of MEMS laser scanning retinal projection display system[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(12): 314-320.
林俊国, 丛强, 许晨, 等. MEMS激光扫描视网膜投影显示系统设计[J]. 光学学报, 2017, 37(12): 314-320.
- [16] YU Daoyin, TAN Hengying. Engineering optics[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2006: 165-192.
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 165-192.