

文章编号:1007-2780(2009)06-0916-06

激光投影显示系统薄型化设计

田志辉^{1,2}, 刘伟奇¹, 冯 睿¹, 柳 华^{1,2}, 魏忠伦¹, 康玉思¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033, E-mail: tianzhi-hui@163. com;
2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 比较了目前超薄投影显示光学系统的特点, 设计了使用于激光显示的超薄投影镜头组。系统的投影距离为 100 mm, 画面尺寸为 157 cm(62 in), 采用 TI 公司的 20.3 mm(0.79 in) DMD 芯片作为空间光调制器, 系统由 1 个非球面反射镜和 5 片透射镜片组成。从软件模拟结果看, 系统成像质量良好。该设计对元件的加工、装调工艺要求较低, 有利于降低投影系统的整体成本。

关 键 词: 激光显示; 面阵空间光调制器; 投影镜头; 光焦度
中图分类号: TN873 **文献标识码:** A

1 引 言

与传统电视相比, 激光电视具有色域大、颜色饱和度、显示画面尺寸灵活可变、无电磁射线辐射等优点^[1], 是获得大屏幕彩色电视图像的有力手段。1965 年, 美国 Texas 仪器公司发布了第一个激光电视研制成功的消息。随后 10 多年里, 多家科研机构对激光电视进行了许多研究, 但是并没有取得突破性的进展, 其主要原因有两个: 一是扫描装置技术难度大, 不易批量生产; 二是激光器的发光效率低、电功耗大, 难以实用化。进入 20 世纪 90 年代, 激光电视技术又呈现迅速发展的趋势, 到 90 年代末, 已经出现了许多基于各种光学显示方式的激光显示系统^[2-5]。近年来, 由于微电子技术和加工等相关技术的支持, 激光电视发展迅速。固体激光技术的发展使三基色光源固体化, 效率大幅提高。信息和多媒体显示的市场需求也刺激了激光电视的快速发展^[6]。

全固态激光显示技术采用红、绿、蓝固体激光器(DPL)作为彩色显示的三基色, 将彩色电视视频图像投影显示于屏幕上。目前的激光投影显示主要采用两种方式: 一种是扫描式的投影成像方式, 另一种是采用面阵空间光调制器的投影成像方式。国外报导的激光电视主要是点扫描式和线

扫描式两种, 目前也只是研制出原理样机, 尚未形成产品。它们都是采用激光束扫描方式结合光强调制, 经光束合成系统使调制好的 R、G、B 三束光合成为彩色图像, 投影到屏幕上。扫描式投影显示方式存在“光束扫描”和“光强调制”两大技术瓶颈, 目前难以得到迅速发展^[7]; 而采用面阵光阀的投影方式则可以避开上述技术难点。现在激光显示技术追求的目标是显示更大更细腻的画面, 然而画面越大, 整个机构就越厚, 因此激光显示系统的薄型化是当前激光显示领域的一个重要课题。

本文设计了应用于激光显示的超薄投影镜头组。系统的投影距离为 100 mm, 画面尺寸为 157 cm(62 in), 采用 TI 公司的 20.3 mm(0.79 in) DMD 芯片作为空间光调制器, 系统由 1 个非球面反射镜和 5 片透射镜片组成。从软件模拟结果上看, 系统成像质量良好。该设计对元件的加工、装调工艺要求较低, 有利于降低投影系统的整体成本。

2 超薄投影镜头技术

目前, 应用于超薄背投显示方式中的投影镜头组主要有折射式投影镜头、反射式投影镜头和折反射式投影镜头 3 种, 下面分别予以介绍。

2.1 折射式投影镜头

该类镜头组完全由折射式镜片组成, 其中最

有代表性的为 J. Gohman 等人 在 2005 年 SID 上展示的折射式超薄投影镜头。图 1 为此镜头的外型图,表 1 列出了镜头的性能指标。

为了实现大角度投影,要求前组的放大倍率非常大,在这种情况下,要得到无畸变的投影画面,就必须对镜组进行复杂化设计。若要实现 150° 以上的视场角,通常需要 20 片以上的镜片,其中至少包括一片以上的非球面或自由曲面。这必将增加光学引擎的成本,而且这么多的镜片,系

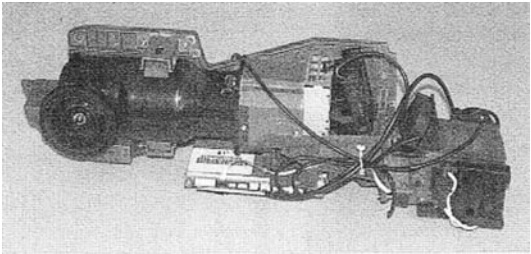


图 1 折射式投影镜头
Fig. 1 Refractive projection lens

表 1 折射式投影镜头性能指标

Table 1 Performance of refractive projection lens							
Lens Type	Projection angle	Projection Distance	Image size;16×9	Pupil	Focal length	F-number	Distortion
Refractive wide-angle	153° full field	281 nm	161 cm(63.5 in) diagonal	Telecentric	3.84 mm	3.0	<0.5%

统的光能损失也是很大的。

2.2 反射式投影镜头

该类投影镜头组通常由 4 片非球面或自由曲面反射式镜片组成。图 2 为 NEC 公司在 2004 年 SID 上展示的反射式超薄背投影光学系统^[8]。表 2 列出了此光学引擎的性能指标。

目前应用该种结构的主要为日本公司,如佳能、尼康、奥林巴司、NEC 等。该类镜组的优点是全部采用反射形式,不产生色差,镜片数量少。但是,由于采用了 4 个非球面反射镜,而且采用离轴形式,所以对加工、装调的精度要求比较高。

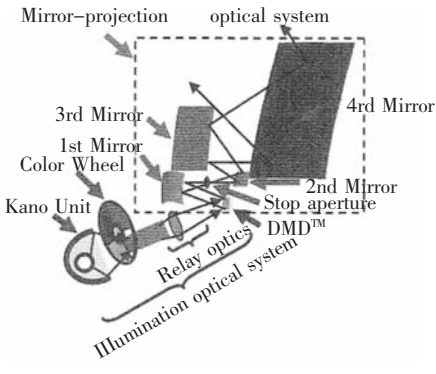


图 2 反射式投影镜头
Fig. 2 Reflective projection lens

表 2 反射式投影镜头性能指标

Table 2 Performance of reflective projection lens						
Projection optical system	Projection angle	Projection distance	Fno	Screen size	Focus adjustment	Illumination optical system
Aspherical-projection	130°	0.06 m@40"~0.65 m@100" from front of set	3.5	100 cm(40 in)~254 cm(100 in)	Electrical power focus	Mixing rod/Relay optics
Brightness	Uniformity	Contrast ratio	DMD™	Number of pixels	Light source	
1 500 lm	80%	3 000:1@(on/off)	17.5 mm(0.69 in) diagonal single chip tilt angles of +/- 12°	1 024×768@(XGA)	220 W DC high pressure mercury discharge lamp	

2.3 折反射式投影镜头

该类投影镜头组由一片非球面或自由曲面反射镜和一组投射式镜片组成。图 3 为 Shinsuke Shikana 等人 在 2002 年 SID 上展示的折反射式超薄背投影光学引擎^[9]。图 3 列出了此光学系统的技术指标。

目前应用这种结构的系统最多,如三星、索

尼、日立等公司,国内的 TCL 与汤姆逊公司合作的首款背投电视也采用这种形式。采用非球面反射镜可以避免色差的产生,同时系统采用同轴形式,降低了装调的难度;但是,就目前已知的情况来看,透射镜组在远心的情况下,所需镜片数量较多(10 片以上),而且多包含自由曲面。

表 3 折反射式光学引擎技术指标

Table 3 Performances of reflective-reflective hybrid projection lens

Projection optics	Projection angle	Projection distance	Entrance pupil	Illumination optics	Optical output	Contrast ratio
Refractive-reflective hybrid system	136°	410 mm from theaspherical mirror	Non-telecentric	Mixing rod/ Relay optics Non-telecentric	500 ANSI lumen@120 W lamp	2 000:1@(on/off)

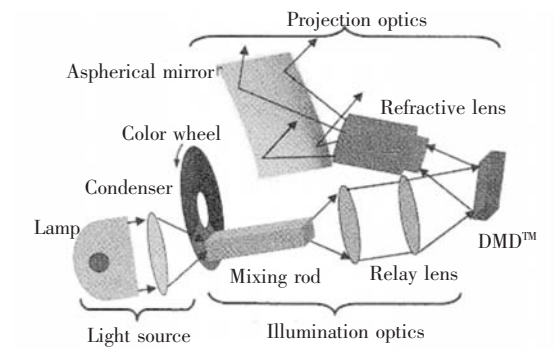


图 3 折反射式投影镜头示意图

Fig. 3 Reflective-reflective hybrid projection lens

3 激光显示超薄投影系统设计

反远距物镜在结构上,负光焦度透镜组作为前组,正光焦度透镜组作为后组,前组与后组分离,其高斯光学如图 4 所示。

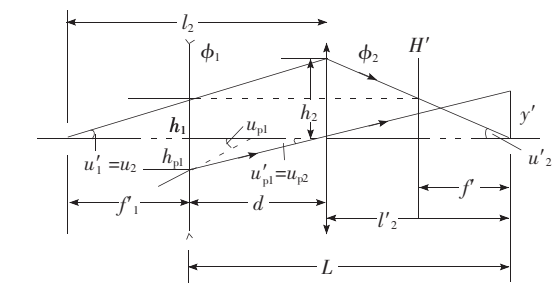


图 4 反远距物镜的高斯光学

Fig. 4 Gauss optics of reversed telephoto

在规化条件下,即总光焦度 $\varphi=1$,设 φ_1 为前组光焦度, φ_2 为后组光焦度, d 为前组和后组之间的距离。

当 $h_1=-1$ 时, $u_2=1$ 。
假定轴外主光线通过后组, $h_{p2}=0$,再令 $u_{p1}=-1$,此时:

$$l'_{p1}=d \tag{1}$$

而 $J=-h_1u_{p1}=1$

前组主光线角放大率的倒数为:

$$\frac{1}{r_1}=\frac{u_{p1}}{u_{p1}}=1-d\phi_1 \tag{2}$$

且
$$l'_2=h_2=1-\phi_1=\frac{1}{r_1} \tag{3}$$

即前组角放大率的倒数为高斯光学的后工作距离。此时光学系统的总长度为:

$$L=d+l'_2=\frac{1}{r_1}+\frac{1-\frac{1}{r_i}}{\phi_1} \tag{4}$$

前后二组的光焦度与 $1/r_1$ 的关系为:

$$\varphi_2=\frac{1-\phi_1}{\frac{1}{r_i}} \tag{5}$$

前后二组负担的孔径角为:

$$u'_1=\phi_1$$
$$u'_2-u'_1=1-\phi_1 \tag{6}$$

前组轴外主光线负担的相对孔径为:

$$2h_{p1}\phi_1=\frac{2\left(\frac{1}{r_i}-1\right)}{\frac{1}{r_i}} \tag{7}$$

前组轴外主光线的高度为:

$$h_{p1}=\frac{\frac{1}{r_i}-1}{\frac{1}{r_i}\varphi_1} \tag{8}$$

根据上述公式,给定 $1/r_1$ 和 φ_1 就可以求出 φ_2 、 h_2 、 h_{p1} 和光学总体长度 L ,并计算出前后二组的相对孔径。

反远距物镜的后工作距离 l'_2 是有一定要求的。由式(3)看出, $1/r_1$ 与 h_2 、 l'_2 相等,因此为了加长后工作距离,必须增大前组的 $1/r_1$,而前组 $1/r_1$ 的增大将使前组的视场角增大。由此可见,必须首先给定足够大的 $1/r_1$ 。

对于反远距物镜,除要求它具有足够长的后工作距离和较大的视场之外,还希望它的结构尺寸尽可能简单紧凑、筒长短、体积小。由式(4)可

以看出,为了缩短筒长 L ,必须减小前组和后组之间的距离 d ;而由式(2)可以看出,当 $1/r_1$ 确定后, d 与 φ 之间的关系是一定的,如要求减小 d ,必须增大 φ_1 , φ_1 增大必然引起 φ_2 增大,由此必然引起与孔径有关的高级象差的增加。为了降低由此产生的高级象差,就要使结构复杂化。反过来说,为了避免结构形式的过分复杂化,当 $1/r_1$ 确定后,就要减小 φ_1 ;而减小 φ_1 则又必然增大 d ,从而使得筒长和体积增加。总之, $1/r_1$ 、 d 、 φ_1 三者之间是相互关联的,其中 $1/r_1$ 是主导的,它决定反远距物镜的后工作距离和视场角,并且在很大程度上制约外形尺寸和结构的复杂化程度。

综上所述, $1/r_1$ 、 d 、 φ_1 的确定,既要满足长工作距离和大视场角的需求,又要考虑外形尺寸和结构的复杂化程度。因此, $1/r_1$ 、 d 、 φ_1 三者的优化选取至关重要。

这种设计方法被用来设计激光显示的投影系统,设计了超薄投影镜头组,如图 5 所示。



图 5 超薄投影镜头组示意图

Fig. 5 Projection lens of ultra-thin rear projector

系统由 1 个非球面反射镜和 5 片透射镜片组成,采用 TI 公司的 20.3 mm(0.79 in)DMD 芯片作为空间光调制器。系统的投影距离为 100 mm,视场角约为 160° ,画面尺寸为 157 cm(62 in)。 F 数为 3.5,由于采用激光作为光源,可以满足能量利用率要求。

4 计算分析与软件模拟

图 6 为系统折射部分示意图。

该部分由 2 片双胶合透镜和 3 片单透镜组成,远心结构。透镜均采用国产常用光学玻璃材

料,系统仅含有一片非球面透镜,这对降低投影系统成本、实现产业化是非常有利的^[10]。

图 7 表示的是投影图像的畸变图。

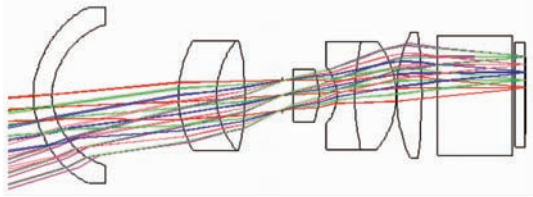


图 6 折射部分示意图

Fig. 6 Refractive part of the optical system

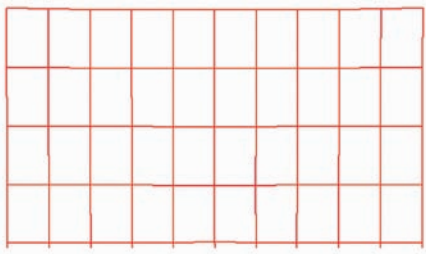


图 7 投影图像的畸变图

Fig. 7 Distortion plot of the projection picture

图像的长宽比为 16:9,畸变量小于 1%。图 8 为投影镜头的点列图,弥散圆直径均小于一个像素。图 8 表示的是投影镜头的调制传递函数图,在奈奎斯特频率下均大于 0.6,解析度为 $1\,280\times 720$ 。

图 9 为投影镜头的 MTF 图。

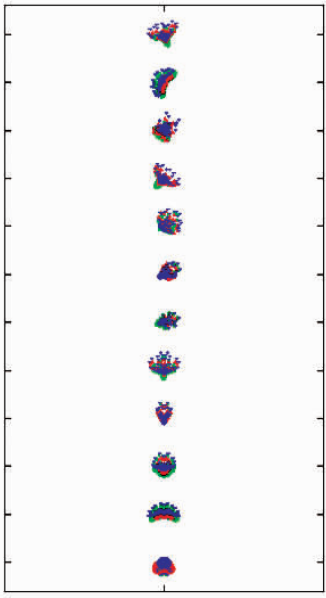


图 8 投影镜头的点列图

Fig. 8 Spot diagram of the projection lens

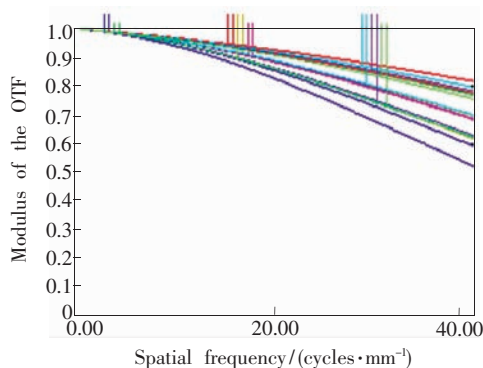


图 9 投影镜头的 MTF 图

Fig. 9 MTF versus frequency for the projection lens

5 结 论

设计了应用于激光显示的超薄投影镜头组,系统的投影距离为 100 mm,视场角约为 160°,画面尺寸为 157 cm(62 in), F 数为 3.5。由于采用激光作为光源,可以满足能量利用率要求。采用 TI 公司的 20.3 mm(0.79 in)DMD 芯片作为空间光调制器。系统由 1 个非球面反射镜和 5 片透射镜片组成。从软件模拟结果上看,系统成像质量良好,对加工、装调工艺要求较低,有利于降低投影系统成本、实现产业化生产。

参 考 文 献:

- [1] 刘伟奇,魏忠伦,康玉丝,等. 全固态激光彩色视频显示技术 [J]. 液晶与显示,2004,19(5):325-328.
- [2] Hrbek G, Lekavich J, Watson W. An improved laser color TV system using acousto-optic interaction [J]. *Proc. SID*,1971,29(2):77-85.
- [3] Lowry J B, Welford W T, Humphries M R. Pulsed scophny laser projection system [J]. *Optics and Laser Technology*, 1988,20(5):255-258.
- [4] Ketabchi Mehrdad, Bering Mikael. Polygonal scanner subsystem for laser display [J]. *SPIE*,1997,3131:20-29.
- [5] Christhard Deter, Juergen Kraenert. High resolution scanning laser projection display with diode pumped solid state lasers [J]. *Proc. SPIE*,2000,3954:175-184.
- [6] Kennedy K W, Martinsen R J, Radl A J, *et al.* Laser-based SXGA reflective light valve projector with E-cinema quality contrast and color space [J]. *Proc. SPIE*, 2000,3954:168-174.
- [7] 康玉思,刘伟奇. 扫描式匀场照明技术研究 [J]. 光学 精密工程,2004,12(4): 45-47.
- [8] Jun Ogawa, Azuhiro Agata, Mikio Sakamoto, *et al.* super-short focus front projector with aspheric mirror projection optical system [C]//*SID*,Seattle, USA;SID Press Relation Office,2004:170-173.
- [9] Shinsuke shikama, Hiroshi Suzuki. Optical system of ultra-thin rear projector equipped with refractive-reflective projection optics [C]//*SID*,Boston, USA;SID Press Relation Office,2002:1250-1253.
- [10] 王之江. 光学设计理论基础 [M]. 北京:科学出版社,1985.

Design of Ultra-Thin Rear Projector for Laser Display System

TIAN Zhi-hui^{1,2}, LIU Wei-qi¹, FENG-Rui¹, LIU-Hua^{1,2}, WEI Zhong-lun¹, KANG Yu-si¹

(1. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China, E-mail: tianzhi-hui@163.com;

2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract

The merits and the shortcomings of several popular kinds of surface type light valve in market-place were compared according to the characteristic of laser display. Adopting the feature of laser display and comparing the characteristics of current ultra-thin optical projection display systems, an

ultra-thin lens for laser TV was designd. The projection distance is 100 mm, the screen size is 157 cm (62 in). Using TI's 20.3 mm(0.79 in) DMD chip as spatial light modulator, the system is composed of a aspherical mirrors and five refractive lens. It is showed from the simulation results that the imaging quality of the system is good. It has lower request for components processing and alignment in the design.

Key words:laser display;surface type light valve;projection lens;lens power

作者简介:田志辉(1981—),男,吉林长春人,博士研究生,主要从事激光显示方面的研究。

包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位

量的名称	名称	符号	SI 导出单位
			用 SI 基本单位和 SI 导出单位表示
[平面]角	弧度	rad	1 rad=1 m/m=1
立体角	球面度	sr	1 sr=1 m ² /m ² =1
频率	赫[兹]	Hz	1 Hz=1 S ⁻¹
力	牛[顿]	N	1 N=1 kg·m/S ²
压力,压强,应力	帕[斯卡]	Pa	1 Pa=1 N/m ²
能[量],功,热量	焦[耳]	J	1 J=1 N·m
功率,幅[射能]通量	瓦[特]	W	1 W=1 J/S
电荷[量]	库[仑]	C	1 C=1 A·S
电压,电动势,电位	伏[特]	V	1 V=1 W/A
电容	法[拉]	F	1 F=1 C/V
电阻	欧[姆]	Ω	1 Ω=1 V/A
电导	西[门子]	S	1 S=1 Ω ⁻¹
磁通[量]	韦[伯]	Wb	1 Wb=1 V·S
磁通[量]密度,磁感应强度	特[斯拉]	T	1 T=1 Wb/m ²
电感	享[利]	H	1 H=1 Wb/A
摄氏温度	摄氏度	℃	1 ℃=1 K
[光]通量	流[明]	lm	1 lm=1 cd·Sr
光照度	勒[克斯]	lx	1 lx=1 lm/m ²
[放射性]活度	贝可[勒尔]	Bq	1 Bq=1 S ⁻¹
吸收剂量	戈[瑞]	Gy	1 Gy=1 J/kg
剂量当量	希[沃特]	Sv	1 Sv=1 J/kg