

doi:10.3788/gzxb20144308.0822005

超广角数字通用型投影镜头设计

李维善, 陈琛, 宋涛, 张禹, 刘宵婵

(秦皇岛视听机械研究所, 河北 秦皇岛 066000)

摘 要:为了解决现有超广角数字投影镜头存在的缺陷和不足, 并与不同类型和规格数字投影机的超广角投影匹配, 给出了 8 组 9 片式超广角数字通用型投影镜头的光学系统设计. 镜头焦距为 8.76 mm、全视场角达到 97° 、 F 数为 2.12、后工作距离大于 34 mm、最大口径小于 96 mm、总长小于 200 mm, 结构中加入了 1 个偶次非球面, 较好地校正了轴外像差与畸变. 用减少透镜数量和增大相对孔径的办法提高了像面照度; 通过增大光阑慧差及减小像方半视场角, 提高了像面相对照度, 其值达 97.46% 以上. 通过合理确定棱镜等效厚度及调整结构布局, 使结构适配光学引擎中棱镜的有效光学厚度为 16.5~23 mm. 设计的镜头分辨率达 120 lp/mm、全视场相对畸变绝对值小于 1.5%. 结果表明: 该镜头可满足 0.55in~0.76in 3LCD 和 1DLP 类型的各种数字投影机的使用, 最小投射比可达 0.53:1, 投影画面偏移量最大达到 389 mm, 结构简单, 体形小, 成本低, 成像质量好, 可批量化生产.

关键词: 光学设计; 超广角投影镜头; 非球面; 相对照度; 光阑慧差; 调制传递函数; 分辨率; 画面偏移量
中图分类号: TH703; TH741.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4213(2014)08-0822005-9

Design of Ultra Wide-angle Digital Universal Projection Lens

LI Wei-shan, CHEN Chen, SONG Tao, ZHANG Yu, LIU Xiao-chan

(Qinhuangdao Audio-visual Machinery Research Institute, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: To solve defects and deficiencies of the existing ultra wide-angle digital projection lens and match the ultra wide-angle projecting from different types and specs of digital projectors, a type of ultra wide-angle digital universal projection lens composed of nine lenses was designed. The focal length is 8.76 mm, the full field of view reaches 97° , F -number is 2.12, BFL is longer than 34 mm, the largest diameter is less than 96 mm and the total optical length is shorter than 200 mm. By setting an effective even aspheric, the off-axial aberrations and distortion are corrected well. By reducing the number of lens and increasing the relative aperture, illumination is improved. By increasing the aperture coma of the system and reducing the FOV of image, relative illumination is improved up to 97.46%. By determining the prim thickness and adjusting the structure and layout, the lens can match prisms of different effective optical thicknesses from 16.5 mm~23 mm in several kinds of digital projector engines. The resolution is 120 lp/mm, and the absolute value of relative distortion is less than 1.5%. The design indicates that the lens can match digital projectors by using 3LCD and 1DLP technologies with the chip sizes from 0.55 in to 0.76 in, minimum projection ratio is up to 0.53:1 and the largest frame offset reaches 389 mm. Its image quality is excellent with advantages of simple structure, small size, low cost and mass produced.

Key words: Optical design; Ultra wide-angle projection lens; Aspheric; Relative illumination; Aperture coma; Modulation transfer function; Resolution; Frame offset

OCIS Codes: 220.0220; 220.3620; 220.4610; 220.3630

基金项目: 科技部科研院所技术开发研究专项基金 (Nos. 2010EG119161, 2011EG119199) 和科技部企业科技创新基金 (No. 10C26211303678) 资助

第一作者: 李维善 (1982-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为光学系统结构设计与应用等. E-mail: bruce_2009@126.com

通讯作者: 陈琛 (1968-), 男, 教授级高工, 主要研究方向为影像领域光学系统设计以及国家/行业产品标准制定等. E-mail: chenchen6@yahoo.cn

收稿日期: 2013-11-21; **录用日期:** 2014-04-11

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

超广角投影可以在有限的空间内,以最短的距离投射出最大的清晰画面,成为当今以及未来实际应用中新的需求,被广泛应用于数字教学领域以及以边缘融合技术为基础的现代化数字展示工程领域,如多通道环幕电影、广告宣传、展览馆、博物馆、科技馆和美术馆等领域。

国内外超广角投影技术主要有反射式和直接投射式两种形式^[1]。反射式技术对光学组件的设计和加工工艺要求相当高,其产品价格昂贵,市场采用量极少。直接投射式是指数字投影机将影像通过超广角镜头直接投射到投影屏幕上,在短距离内实现大画面的投影方式,这种技术的核心部件就是超广角数字投影镜头,被广泛地应用在投影领域。

目前,国内外现有的超广角数字投影镜头仍存在着许多技术问题,如投影画面出现扭曲、画面照度低且不均匀、清晰度不够、边缘画面色差大、外形体积大等,同时还存在着投影画面偏移量不足的缺陷。另外,由于目前市场上数字投影机的品牌和规格繁多,所需要的数字投影镜头的规格也很多,不利于镜头的批量化生产,能适用于多品牌、多规格主流数字投影机的超广角数字投影镜头的研究和开发显得十分紧迫。

本文设计了一种 8 组 9 片式超广角数字通用型投影镜头的光学系统,在保证整体像差优异的前提下,最大限度地简化了结构,缩小了外形尺寸,提高了画面清晰度、画面照度以及画面照度均匀性,降低了生产成本,解决了画面偏移量不足的缺陷,且可以满足不同类型和规格的主流数字投影机的使用,通用性好。

表 1 主流数字投影机显示芯片尺寸及比例对应的棱镜有效厚度

Table 1 Panel sizes and ratio of mainstream projectors and corresponding prism thicknesses

Panel size(diagonal length)/in	0.76	0.7	0.67	0.65	0.63	0.55
Length-width ratio	16:10	4:3	16:10	16:9/16:10/4:3	4:3	4:3
Prism thickness/mm	23	21	20	19.5	18.5	16.5

超广角数字通用型投影镜头的焦距、视场角与像高的关系式为

$$y' = f' \tan \omega \quad (1)$$

式中, y' 为理想像高, f' 为镜头焦距, ω 为物方半视场角。所以当像高和视场角确定后,便可推算出镜头焦距。镜头的极限分辨率应满足关系式^[4]

$$p_x = \frac{1}{2 \times D} \quad (2)$$

表 2 不同数字投影机对应的镜头极限分辨率

Table 2 Different types digital projectors and corresponding the ultimate resolution of the lenses

Panel size/in	0.76	0.7	0.67	0.65	0.63	0.55
Chip pixel	1920 * 1200	1024 * 768	1920 * 1200	1920 * 1080/1280 * 800/1024 * 768	1024 * 768	1024 * 768
Ultimate resolution/(lp/mm)	59	36	66.5	66.8/45.7/38.8	40	45.8

根据上述对应关系可确定超广角数字通用型投影

1 技术参数确定

在现代数字投影显示技术中^[2-3],尽管投影显示的方式各种各样,但是投影显示的基本系统可看作为由光源、光学照明系统、空间光调制器以及投影镜头与屏幕系统这几个部分构成。

数字投影镜头作为成像部分将图像信息放大成像到屏幕上进行显示,系统的放大率,投影光束的大小,投影画面的能量分布以及投影画面的成像质量都取决于数字投影镜头。数字投影镜头的光学特性通常用焦距、视场角、相对孔径和后工作距离表示。而对于超广角数字通用型投影镜头,首先是具有超大视场角,大相对孔径,小投射比和长后工作距离的特征。所谓“通用型”是指镜头可以同时满足采用不同技术类型(LCOS、LCD、DLP)、不同显示芯片尺寸(对角线为 0.55 ~ 0.76in)、不同芯片长宽比(4:3、16:10 和 16:9)、不同品牌的数字投影机的使用。但是由于不同型号的数字投影机内部光学引擎中的合光/分光棱镜组的结构会因数字投影机显示芯片的大小不同而有所差异,而这种差异造成了光学引擎棱镜轴向有效出射光程的不同,该光程长度差会引起非平行光路中的棱镜产生各种像差,所以,超广角数字通用型投影镜头本身应该具有较强的像差容差性。来包容因棱镜轴向有效出射光程不同而产生的各种像差的多余量。

表 1 给出了目前投影市场上几种主流数字投影机(3LCD 和 1DMD)的显示芯片大小(对角线长度)、显示芯片长宽比与光学引擎中棱镜轴向光线有效出射长度(设计时展开等效平行平板)的对应关系。

式中, p_x 为芯片单像素的宽度(长边尺寸), D 为镜头的极限分辨率。所以不同的芯片单像素尺寸对镜头的极限分辨率的要求不同,表 2 给出了几种不同数字投影机对数字投影镜头极限分辨率的要求。而超广角数字通用型投影镜头的极限分辨率必须达到或超过表 2 中列出的最高极限分辨率的要求,才能同时满足这几种数字投影机的使用。

镜头的光学技术参数如表 3 所示。

表 3 光学技术参数
Table 3 Optical technology parameters

Focal length/mm	Full angle of view/(°)	Relative aperture	Image height/mm	Working distance/mm	MTF
$f' = 8.7$	$2\omega = 97$	$D/f' = 1/2.1$	$y' = 19.7$	$L' > 34$	@35lp/mm, MTF ≥ 0.4 @67lp/mm, MTF ≥ 0.15

2 镜头光学机构

根据确定的超广角数字通用型投影镜头的光学技术参数,以已有的技术参数相近的光学结构为基础^[5-7],采用物像颠倒方式进行设计,利用人工改造与ZEMAX光学软件相结合的方法进行优化,其光学结构布局如图1所示,是一种似远心反远距结构。

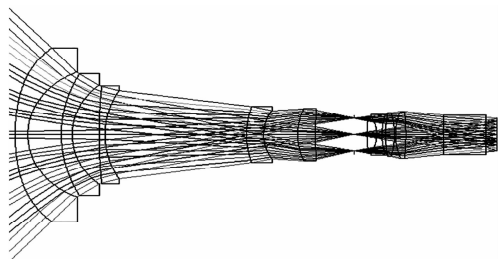


图 1 镜头光学结构

Fig.1 Optical structure diagram of projection lens

考虑到数字投影机内部棱镜系统对像差的影响,设计时把具有一定厚度的平行平板(等效棱镜系统的有效尺寸)加入镜头结构共同优化,使数字投影机内部棱镜系统产生的像差与镜头产生的像差互相抵消,互相平衡.给定系统的设计波长范围为450~640 nm,主波长546 nm(由设计经验和对数字投影机三原色的测试而定)。

现有的超广角数字投影镜头,结构较为复杂,具有11~13片透镜,含有2~4个非球面,另外,采用的光学材料种类多,且价格高^[8-10].而该镜头结构仅含有9片透镜,且只有1个非球面,采用的光学材料种类少,其中非球面透镜材料1种,为价格便宜的光学塑料PMMA,球面透镜材料4种,为常规的、价格低的、性能稳定的中国牌号无色光学玻璃.该镜头结构简单,且成本低.表4为第一面的非球面系数、表5为镜头等效焦距为1 mm时的光学结构参数。

表 4 第一面的非球面系数

Table 4 Aspheric coefficients of the first surface

Conic	0.44
2nd order term	0
4nd order term	$1.11e-006$
6nd order term	$5.19e-011$
8nd order term	$-2.05e-014$
10nd order term	$-2.19e-018$
12nd order term	$6.61e-021$

表 5 光学结构参数

Table 5 Optical structure parameters

Surface number	Curvature radius/mm	Thickness/mm	Material
OBJ	∞	∞	
1	15.88	0.74	PMMA
2	4.70	1.95	
3	8.87	0.63	H-ZK11
4	4.55	1.56	
5	38.93	0.34	H-ZK11
6	6.13	8.22	
7	6.21	0.99	H-LAK51
8	3.03	1.99	
9	4.66	1.04	H-ZF7LA
10	90.90	2.26	
STO	∞	0.74	
12	12.53	0.55	H-ZK3
13	-2.73	0.32	H-ZF7LA
14	5.02	0.20	
15	8.57	0.52	H-ZK11
16	-5.35	0.06	
17	4.69	0.60	H-ZK11
18	-17.01	2.2	

3 关键技术难题的解决

3.1 非球面的合理应用

超广角数字投影镜头具有超大的视场角(80°~120°),以及具有较大的相对孔径,所以系统轴外像差的校正和畸变的校正成为该技术领域的难点;另外,视场角越大,为了保证较好的成像质量,一般镜头的结构就会越复杂,体积越大,成本越高.所以在保证成像质量优良的情况下,进一步地简化结构,缩小体积,降低成本,也成为了该领域面临的技术难题.本结构在适当的位置处加入合理的非球面光学元件,有效地解决了超广角镜头的一些技术难点。

非球面光学元件,是指面形由多项高次方程决定,面形上各点的半径均不相同的光学元件^[11-14].非球面在ZEMAX软件中的表示方程式为

$$Z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^8 a_i r^{2i} \quad (3)$$

式中, r 为径向坐标, $r^2 = x^2 + y^2$, c 为曲面顶点的曲率, k 为二次曲面系数, Z 为镜面的凹陷度, $a_1 \sim a_8$ 为高次

非球面系数. 从式(3)可以看出, 非球面的面形是由几个参数决定的, 不像球面只有一个参数 R 决定其面形, 所以非球面在光学系统校正像差中具有显著的优点, 它增加了自变量, 校正像差的能力得到加强, 在保证成像质量不变的情况下简化了系统. 该结构中将第一面设为非球面, 首先它在系统中远离孔径光阑, 有利于校正系统的轴外像差. 另外, 其处于系统的前部位置, 可以有效地校正畸变, 且有利于缩小系统的最大外径以及简化系统结构, 减小重量. 最终该镜头最大外径小于 $\phi 96$ mm, 系统总长小于 200 mm, 仅由 9 片透镜组成, 且只含有一组双胶合透镜, 具有结构简单、体形小、重量轻的特点.

3.2 像面照度及像面相对照度的提高

现有的超广角数字投影镜头存在着画面照度低, 且不均匀(相对照度低)的缺陷.

相对照度是指像平面不同坐标点的照度和中心点照度之比. 成像系统中, 如果相对照度很小, 则像平面的照度就会很不均匀, 镜头投射的画面亮度均匀性就很差^[15]. 像点照度公式的推导基于图 2、3 的计算模型, 图 2 中轴上点附近的物和像的微小面积分别为 ds 和 ds' , 物方和像方孔径角分别为 U 和 U' , 物面和像面亮度分别为 B 和 B' , 物方 ds 在 U 立体角内发出的光通量 Φ 为

$$\Phi = \pi \cdot B \cdot ds \cdot \sin^2 U \quad (4)$$

从出瞳入射到像面上的光通量 Φ' 为

$$\Phi' = \pi \cdot B' \cdot ds' \cdot \sin^2 U' \quad (5)$$

则轴上点像面照度 E_0' 为

$$E_0' = \frac{\Phi'}{ds'} = \pi \cdot B' \cdot \sin^2 U' = \pi \cdot B \cdot \tau \cdot \sin^2 U' \quad (6)$$

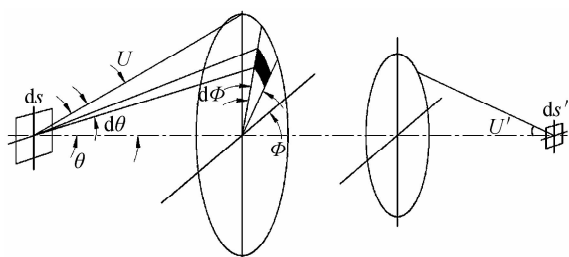


图 2 轴上点照度计算模型

Fig. 2 Calculation model of axial luminance

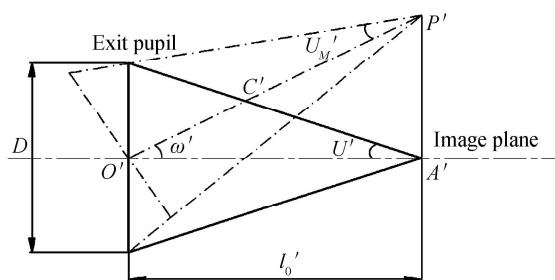


图 3 轴外点照度计算模型

Fig. 3 Calculation model of off-axial luminance

式中, τ 为光学系统的透过率, $B' = B \cdot \tau$. 另外, 因为

$$\sin^2 U' = \frac{D}{2f'} \quad (7)$$

故

$$E_0' \approx \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot B \cdot \tau \cdot \left(\frac{D}{f'}\right)^2 \quad (8)$$

图 3 中轴外像点 P' 对应的像方半视场角为 ω' . 假定物平面上亮度均匀, 且 P' 点的成像光束也充满出瞳(无斜光束渐晕存在), 故出瞳射向 P' 点的光束亮度与射向 A' 点的一样. 假设出瞳直径 D 与出瞳离像面的距离 l'_0 相比较不大, 则轴外像点 P' 的照度近似为

$$E' = \frac{I \cos \omega'}{l'^2} \quad (9)$$

式中, I 是轴外视场的发光强度, l' 是 $O'P'$ 的长度. 由于 $I = I_0 \cos \omega'$, $l' = l'_0 / \cos \omega'$, I_0 是中心视场的发光强度, 则

$$E' = (I_0 / l'_0{}^2) \cos^4 \omega' \quad (10)$$

又因, 轴上点 A' 的照度为 $E_0' = I_0 / l'_0{}^2$, 故, 轴外像点照度为

$$E' = E_0' \cdot \cos^4 \omega' = \pi \cdot B \cdot \tau \cdot \sin^2 U' \cdot \cos^4 \omega' = 1/4\pi \cdot B \cdot \tau \cdot (D/f')^2 \cdot \cos^4 \omega' \quad (11)$$

系统相对照度为

$$\frac{E'}{E_0'} = \cos^4 \omega' \quad (12)$$

从式(8)、(11)、(12)可以看出, 轴上像点照度 E_0' 与光学系统的透过率、相对孔径的平方成正比; 轴外像点照度 E' 与光学系统的透过率、相对孔径的平方成正比, 然而会随像方半视场角 ω' 的增大, 按 $\cos^4 \omega'$ 规律降低; 系统相对照度 E'/E_0' 随像方半视场角 ω' 的增大, 而按 $\cos^4 \omega'$ 规律下降.

上述的分析是基于系统无斜光束渐晕的情况下给出的, 而对于超广角镜头, 其系统必然存在着斜光束渐晕, 此时系统的相对照度则为

$$\frac{E'}{E_0'} = K_a \cos^4 \omega' \quad (13)$$

式中, K_a 为渐晕系数, 即

$$K_a = A_w / A_p \quad (14)$$

式中, A_w 是斜成像光束在垂直于光轴方向度量的截面积; A_p 是轴上光束在垂直于光轴方向度量的截面积.

所以, 对于一个光学系统, 可以通过提高透过率, 增加相对孔径来提高像面的照度; 通过减小像方半视场角 ω' , 增加渐晕系数 K_a 提高像面的相对照度.

对于像面照度的提高, 镜头结构设计时, 通过减少使用透镜数量和增大相对孔径的办法来解决. 现有的超广角数字投影镜头的光学结构一般都含有 11 片及以上的透镜, 且相对孔径小于 1/2.4. 而本光学结构仅采用 9 片透镜, 透过率至少可以提高 4% 以上(以多层膜透过率 99% 计算). 另外, 设计时通过在适当的位置

加入有效合理的非球面以及合理的布局光焦度,进一步提高了结构的相对孔径 $D/f'=1/2.1$.

而对于像面相对照度的提高,镜头结构设计时是通过产生像差渐晕以及减小像方半视场角 ω' 的办法来解决的.

所谓像差渐晕就是轴外物点实际成像光束在近轴入瞳面上的投射宽度大于轴上点光束宽度.像差渐晕源于光阑慧差,且光阑慧差越大像差渐晕越明显.而光阑慧差是由于孔径光阑通过前组成像为入瞳时所产生的像差.

如图4所示, M, M_1 是孔径光阑的上、下边缘, M', M'_1 是近轴入瞳P的上下边缘.对于轴上点而言, M 与 M', M_1 与 M'_1 为共轭关系,充满近轴入瞳的轴上物点光线可以充满孔径光阑S;对于轴外物点(半视场角超出近轴范围)而言,因为光阑慧差的存在,经过近轴入瞳边缘的光线在光阑面上的投射高度($M''M'_1$)却小于孔径光阑直径(MM_1).所以,如果能保证轴外光束充满孔径光阑S,则其在近轴入瞳P上的宽度必定大于轴上物点的光束宽度,此时渐晕系数 $K_s > 1$,即增加了轴外像点的照度,提高了像面相对照度.

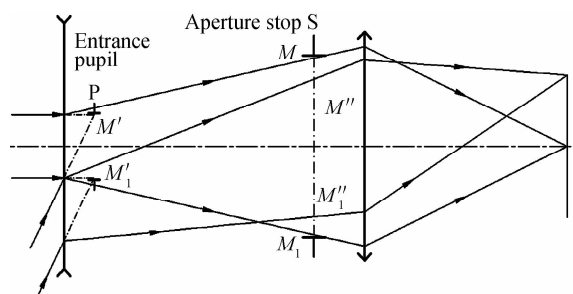


图4 光阑慧差
Fig. 4 Aperture coma

本镜头结构设计时,前组设有4片凹向光阑方向的弯月形负透镜,且第一片透镜的弯曲程度最大,同时具有较大的光焦度绝对值,这种特殊设计产生了大量的光阑慧差,有效地增加了轴外像点的照度,提高了像面照度分布的均匀性.第一片透镜的光焦度在合理的范围内绝对值越大,产生的光阑慧差越大,像差渐晕越明显,结构中其光焦度的绝对值为 $9 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$.另外,前组较多负透镜的设置可以使大视场角光线与光轴的夹角大大减小,从而显著减小后续透镜对应的视场角,使像差的校正更为容易;同时还可以使与物方半视场角 ω 对应的像方半视场角 ω' 显著减小,进而也有效地提高了像面照度分布的均匀性.

另外,镜头的设计采用似远心反远距结构,减小了像方半视场角 ω' ,有效地提高了像面相对照度.

表6为亮度在 1 cd/m^2 时不同视场对应的像面照度和相对照度.

表6 镜头像面照度及相对照度分布
Table 6 Aperture illumination and relative illumination of projection lens

Half field-of view/(°)	Illumination/lx	Relative illumination/(%)
0	0.1482	100
14.6(0.3w)	0.1478	99.77
24.3(0.5w)	0.1469	99.51
34.3(0.707w)	0.1456	98.83
41.2(0.85w)	0.1444	98.21
48.5(1w)	0.1430	97.46

3.3 通用性问题的解决

表1列出了需要同时满足的数字投影机的类型.设计时需将棱镜有效光程尺寸等效为同样厚度的平行平板加入镜头结构中共同优化.平行平板在非平行光路中产生的初级像差量为

$$\text{球差 } \delta L'_p = -\frac{1}{2n'_2 u_2} \sum S_P = \frac{n^2 - 1}{2n^3} du_1^2 \quad (15)$$

$$\text{慧差 } K'_s = -\frac{1}{2n'_2 u_2} \sum S_{HP} = \frac{n^2 - 1}{2n^3} du_1^2 u_{z1} \quad (16)$$

$$\text{象散 } x'_{is} = -\frac{1}{n'_2 u_2} \sum S_{HP} = \frac{n^2 - 1}{n^3} du_1^2 \quad (17)$$

$$\text{匹兹伐尔场曲 } x'_p = -\frac{1}{2n'_2 u_2} \sum S_{VP} = 0 \quad (18)$$

$$\text{式中, } S_{VP} = J^2 \frac{n' - n}{nn'r}, r = \infty.$$

$$\text{畸变 } \delta y'_z = -\frac{1}{2n'_2 u_2} \sum S_{VP} = \frac{n^2 - 1}{2n^3} du_{z1}^3 \quad (19)$$

$$\text{位置色差 } \Delta l'_{FC} = -\frac{1}{n'_2 u_2} \sum C_{IP} = \frac{n-1}{n^2 v} d \quad (20)$$

$$\text{倍率色差 } \Delta y'_{FC} = -\frac{1}{n'_2 u_2} \sum C_{HP} = \frac{n-1}{n^2 v} du_{z1} \quad (21)$$

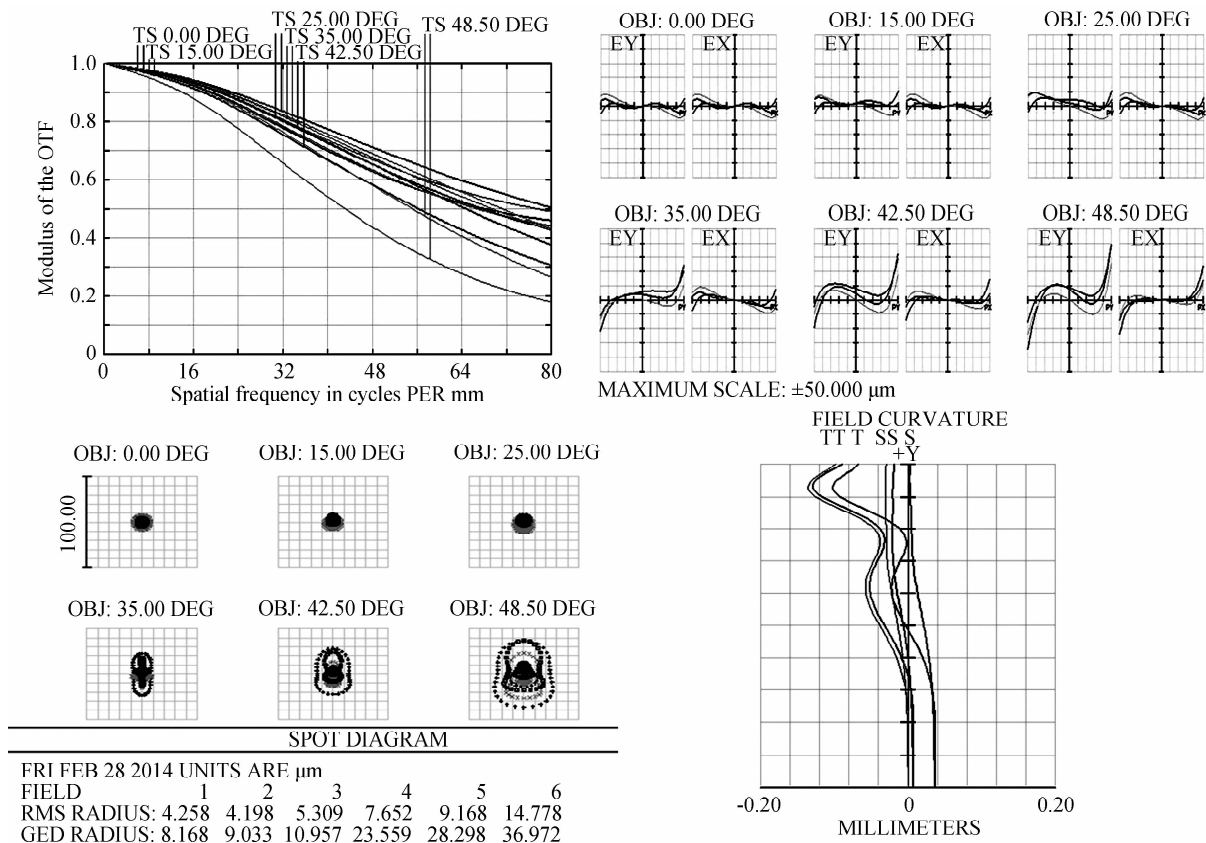
通过各像差量分析可知,平行平板厚度 d 越大,引起的像差量就越大(除匹兹伐尔场曲外),所以设计优化过程中选取合理的平行平板厚度是设计成功的关键.需要满足的数字投影机内部等效平行平板的厚度范围是 $16.5 \sim 23 \text{ mm}$,这就要求所设计的镜头结构在加入任意厚度平行平板之后,产生的各种像差量均能符合实际使用要求,而且镜头结构本身的主要光学参数如焦距、视场角、相对孔径以及后工作距离等不变,所以镜头结构本身应该有能力和平衡因等效平行平板厚度差而造成的各种像差.而设计优化时如果将等效平行平板厚度定为 16.5 mm 或 23 mm ,都将会使设计难度增大,系统结构变得复杂.因为这两种情况所要校正的像差范围最大,所以应该选取厚度范围中间

的某个值,且又符合现有数字投影机内部等效平行平板厚度的,作为设计输入的初始优化值,这样可以最大限度地降低等效平行平板厚度差对像差的影响,故选定等效平行平板厚度为 20 mm. 另外,从式(15)~(21)知,光线孔径角 u_1 、 u_{z1} 越小,等效平行平板产生的像差量就越小. 该镜头结构通过拉大出瞳面与像面之间的距离,有效地减小了等效平行平板入射光线的孔径角,进而降低了像差对等效平行平板厚度差的敏感度.

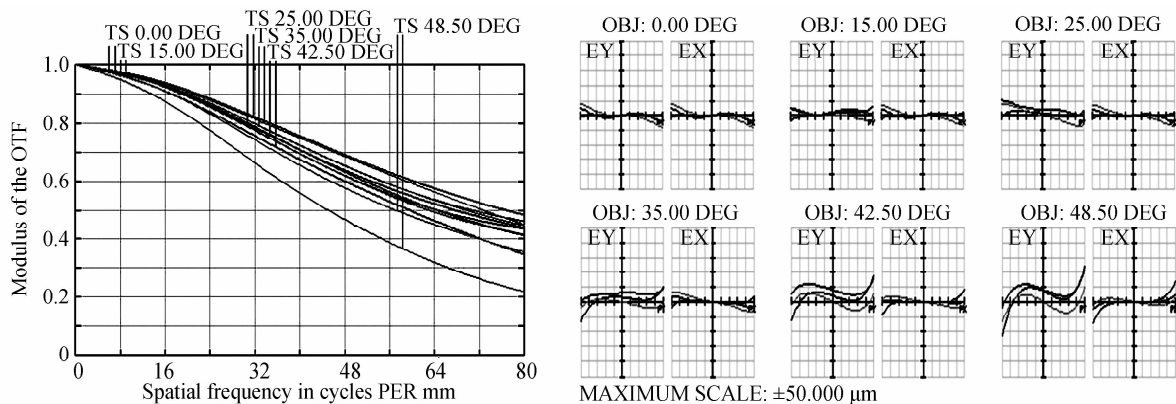
图 5 给出了优化后镜头结构在分别加入等效平行平板厚度为 $d_1=16.5$ mm、 $d_2=20$ mm、 $d_3=23$ mm 时

的 MTF 曲线、特性 Ray Aberration 曲线、点列图和象散、场曲曲线,描述了镜头的整体成像质量,可以确认设计结果的像质完全满足设计指标要求.

MTF 曲线可以较为综合地反映镜头的成像质量. 由 MTF 曲线图知,三种情况下的 MTF 曲线均较为平滑,故镜头边缘成像与中间成像一致性较好;在 10lp/mm 低频处,MTF 值均大于 0.92,镜头具有较好的反差特性;在 66.8lp/mm 处,MTF 值均大于 0.25,镜头具有较高的分辨率.



(a) $d_1=16.5$ mm



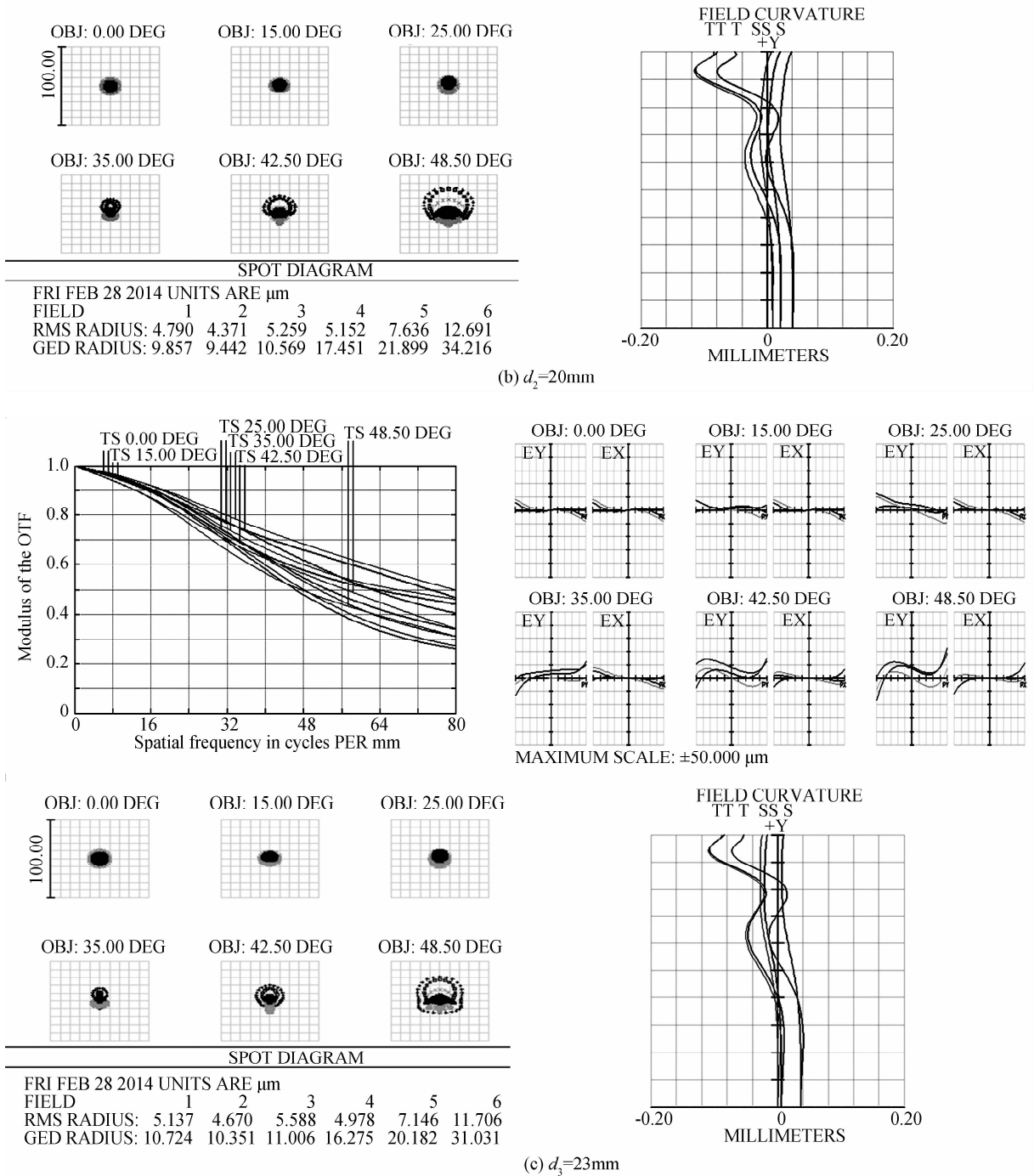


图5 三种厚度等效平行平板的镜头的MTF曲线和垂轴色差曲线

Fig. 5 MTF curves and lateral color curves of projection lens with three thicknesses equivalent parallel plate

镜头结构在加入不同厚度(16.5~23 mm)等效平行平板之后,产生的畸变几乎不变,其畸变曲线如图6所示,最大相对畸变绝对值小于1.5%,全视场95%相对畸变绝对值小于1%,最大畸变在最大视场48.5°处。

市场上超广角数字投影镜头的规格随着数字投影机的规格及所需投射比的不同而不同,种类繁多,通用性较差,不利于镜头的批量化生产. 而该镜头可以同时

满足采用不同投影技术、不同显示芯片尺寸、不同芯片长宽比的数字投影机的使用,表7列出了镜头满足不同数字投影机的情况. 该镜头可以至少取代5种不同规格的、不同投射比的超广角数字投影镜头,通用性好,有利于批量化生产。

该镜头产品已研制成功,且已批量化生产,图7为实际研制生产出的镜头照片,目前该镜头产品已投入市场使用。

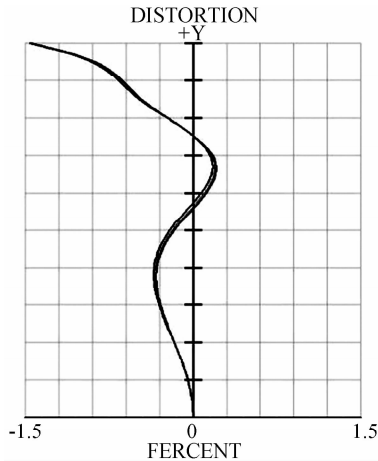


图6 镜头的畸变曲线

Fig. 6 Distortion curve of projecting lens

表8为该镜头部分参数的设计值和测试值与国内市场上某投射比为0.8:1镜头参数的对比.相比之下,该镜头拥有更大的相对孔径、更高的分辨率、较低

表7 镜头满足不同数字投影机的情况

Table 7 The situation of lens used in different types of digital projectors

Panel size/in	0.76	0.7	0.67	0.65	0.63	0.55
Projection technology	3LCD	3LCD/DLP	DLP	3LCD/DLP	3LCD/3LCOS	3LCD/DLP
Length-width ratio	16:10	4:3	16:10	16:9/16:10/4:3	4:3	4:3
Projection ratio	0.53:1	0.62:1	0.61:1	0.61:1/0.63:1/0.67:1	0.69:1	0.79:1
Offset/mm	65	131	136	178/192/217	250	389

表8 镜头参数对比

Table 8 Parameter comparison of lens

Parameter	Design value of the lens	Detection value of the lens	Market lens data
Focal length/mm	8.7	8.76	13.34
Maximum relative distortion absolute value	1.4%	1.47%	2.45%
D/f'	1/2.1	1/2.12	1/2.2
Resolution/(lp/mm)	135	120	80
Edge chromatic aberration/pixel	Longitudinal:0.5 Transverse:0.5	Longitudinal:1 Transverse:1.5	Longitudinal:2.5 Transverse:3
Maximum diameter/mm	$\phi 96$	$\phi 96$	$> \phi 100$
Total length/mm	200	200	> 220

4 结论

本文设计了一种8组9片式超广角数字通用型投影镜头结构.在结构中第一面位置处加入了1个有效合理的偶次非球面,起到了简化结构、缩小体积、提高相对孔径、更好地校正像差及减少光能损失等作用.从光学基础理论出发,分析了影响像面照度和像面相对照度的各种因素,研究并找到了提高像面照度及相对照度的方法,最终,系统的像面相对照度达到了97.46%以上.在“通用性”方面,分析了等效平行平板在非平行光路中的像差,通过合理地确定等效平行平板的厚度及调整结构布局,降低了像差对等效平行平板厚度差的敏感度.设计结果表明,该超广角数字通用



图7 实际生产出的镜头

Fig. 7 The actual produced lens

的边缘色差,改善了投影画面扭曲问题,具有小型化的特点.表7同时列出了镜头用在不同数字投影机,投影距离为1m时,实际的投影画面上下偏移量,最大偏移量可达398mm,而现有的超广角数字投影镜头最大偏移量低于50mm,解决了现有镜头在某些投影环境中出现的画面偏移量不足的缺陷.

型投影镜头体形小,重量轻,成本低,结构简单,最大视场角达到 97° ,相对孔径达到1/2.12,画面偏移量最大可达389mm,分辨率达到120lp/mm,最大相对畸变绝对值低于1.5%,具有较高的成像质量,完全可以满足0.55~0.76in 3LCD和1DLP类型的各种数字投影机的使用,通用性好,可批量化生产.

参考文献

- [1] Analysis of short focal projector technology [J]. *China Educational Technology*, 2009, (7):126.
短焦投影技术解析[J]. *中国电化教育*, 2009, (7):126.
- [2] 刘旭, 李海峰. 现代投影显示技术[M]. 浙江: 浙江大学出版社, 2009:213-390.
- [3] 李林. 现代光学设计方法[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2009:188-198.
- [4] SONG Jia-jun, HE Ping-an. Design of zoom projection lens for the light engine of LCOS rear-projection [J]. *Journal of*

- Applied Optics*, 2007, **28**(1):58-62.
宋家军,何平安.LCOS背投光学引擎中变焦投影物镜设计[J].应用光学,2007,**28**(1):58-62.
- [5] CHEN Chen, LI Wei-shan, ZHANG Yu, *et al.* Optical design of short focal digital projection lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(14): 1855-1859.
陈琛,李维善,张禹,等.短焦数字投影镜头的光学设计[J].光子学报,2011,**40**(12):1855-1859.
- [6] CHEN CH, LIU Xiao-chan, LI Wei-shan, *et al.* Design of light weight small wide-angle projection lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(8): 1266-1269.
陈琛,刘宵婵,李维善,等.轻小型广角投影物镜的设计[J].光子学报,2011,**40**(8):1266-1269.
- [7] LI Wei-shan, CHEN Chen, ZHANG Yu, *et al.* Optical design of digital movie zoom projection lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(10): 1186-1192.
李维善,陈琛,张禹,等.短焦数字电影变焦放映镜头的设计[J].光子学报,2012,**41**(10):1186-1192.
- [8] YONEYAMA K. Wide-angle projection lens and projection-type image display device: US, 6542316 [P]. 2003-04-01.
- [9] KIM J. Wide-angle projection lens: US, 6999247[P]. 2006-02-14.
- [10] NAGAHARA A, YAMAMOTO C. Projection lens and projection display device using the same. US, 7280285[P]. 2007-08-10.
- [11] WANG Yi, NI Ying, YU Jing-chi. Computer controlled polishing technology for small aspheric lens [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(10):1527-1533.
王毅,倪颖,余景池.小型非球面数控抛光技术的研究[J].光学精密工程,2007,**15**(10):1527-1533.
- [12] XUE Dong-lin, ZHANG Zhong-yu, ZHANG Xue-jun. Computer controlled polishing technology for middle or small aspheric lens [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(2):198-204.
薛栋林,张忠玉,张学军.一种中小口径非球面数控抛光技术[J].光学精密工程,2005,**13**(2):198-204.
- [13] XIE Feng, HAO Qun, ZHU Qiu-dong. Best-fit aspheric surface definition based on slope asphericity for aspheric surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11):3197-3202.
谢枫,郝群,朱秋东.基于斜率非球面度的非球面最接近比较球面定义[J].光学学报,2010,**30**(11):3197-3202.
- [14] LIU Hui-lan, SHA Ding-guo, HAO Qun, *et al.* A method for calculating asphericity of high-order optical aspheric surface [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(6):44-47.
刘惠兰,沙定国,郝群,等.一种高次光学非球面度的计算方法[J].光电工程,2004,**31**(6):44-47.
- [15] ZHONG Xing, ZHANG Yuan, JIN Guang. Illumination uniformity optimization of wide-viewing-field optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0322004
钟兴,张元,金光.大视场光学系统像面照度均匀性优化[J].光学学报,2012,**32**(3):0322004.