

doi: 10.3788/gzxb20124111.1307

变焦放映镜头的设计

刘宵婵, 陈琛, 李维善, 张禹, 刘红军

(秦皇岛视听机械研究所, 河北 秦皇岛 066000)

摘 要:为满足场地规格略有不同的影厅的放映需求, 基于机械补偿式的变焦思想, 设计了一个四组九片式的变焦电影放映镜头, 给出了凸轮曲线的设计方法以及光学镜头结构参量, 并通过与一款经典 35 mm 变焦放映镜头结构的对比分析, 阐述了该镜头的特点. 镜头全部采用球面玻璃透镜, 焦距为 26~34 mm, 视场角为 36.2°~28.3°, 相对孔径为 1/1.7. 系统总长为 158 mm, 全口径为 71 mm. 畸变保持在 2% 以内, 在 44.6 线对/毫米的空间频率时, 轴上调制传递函数高于 0.68, 轴外全视场的子午方向调制传递函数高于 0.38, 弧矢方向调制传递函数高于 0.58. 结果表明, 本系统具有亮度高、像面稳定、结构紧凑、工艺性好等优点.

关键词:光学设计; 变焦放映镜头; 数字微镜器件芯片

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)11-1307-5

0 引言

由于影厅以及银幕的规格均大小不一, 标准定焦镜头无法精准地满足每个影院的放映需求, 会出现画幅超过幕布, 或画幅过小的情况, 使用变焦放映镜头就可解决上述问题, 可在一定范围内根据放映场所的实际情况将画幅调整到合适的尺寸. 电影放映镜头比一般投影镜头在亮度、色彩饱和度以及清晰度等方面提出了更高的要求, 变焦电影放映镜头在变焦的全过程中均需保持较高的成像质量, 并且机械结构复杂, 受加工工艺等方面的制约, 设计和制造难度大, 目前市场上的此类镜头均来自于国外知名镜头制造厂家, 价格高昂. 为了达到上述成像要求, 以往的变焦结构^[1-5]一般会加入非球面透镜, 或增加透镜片数使结构复杂化. 使用非球面, 就需要使用塑料, 塑料的稳定性低, 在高功率的放映机灯光的长时间照射下, 必然导致其光学性能受到影响, 成像质量会随之变差, 另外还需要一定的产量才能降低非球面加工的成本. 而片数多除了会导致材料成本上升以及镜头亮度降低以外, 还使本来就复杂的变焦系统更加繁琐、笨重, 给运动机构增加了负担^[6-10]. 为此, 本文设计了一款结构紧凑、简单、片数少的变焦镜头, 且全部透镜均为球面玻璃透镜, 保证较高成像质量的同时, 又降低了加工的难度, 具有较高的实用价值.

1 变焦镜头的高斯解分析

光学系统的变焦过程是焦距连续变化而像面位

置保持不变且成像质量保持良好的过程, 其焦距的变化通过改变运动组份之间的间隔完成. 其像面补偿方式包括光学补偿和机械补偿两种方式. 机械补偿对于结构紧凑化以及片数的精简十分有利, 并且可以实现连续变焦过程中的最佳像面位置补偿, 故本文选择机械补偿的变焦补偿形式. 整个变焦过程中, 镜头长度保持不变, 且镜头相对放映机的位置不变, 其结构包括前固定组、变倍组、补偿组和后固定组. 其中, 前固定组和后固定组的光焦度为正, 变倍组、补偿组的光焦度为负, 变焦过程如图 1 所示. 系统从短焦到长焦的变化过程中, 变倍组和补偿组的位置关系是从分离到靠拢, 后又一起向右运动, 距离再次变大.

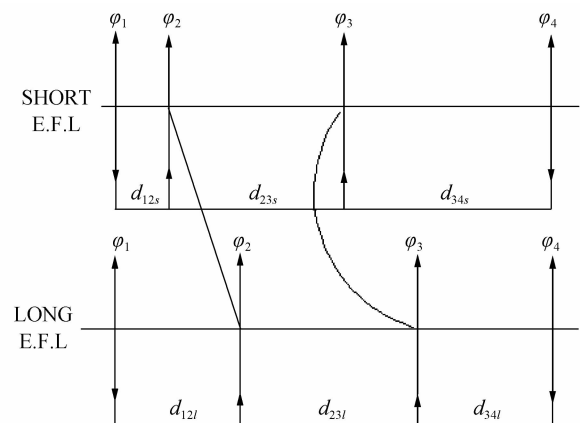


图 1 变焦结构

Fig. 1 The picture of zoom group moving

为保证像面位置不变, 就需要使变倍组和补偿组的移动引起的像面漂移能够相互抵消, 可用微分方程表示为

基金项目: 国家科技部(No. 2010EG119161)和科技部中小企业创新基金(No. 10C26211303678)资助

第一作者: 刘宵婵(1981—), 女, 工程师, 硕士, 主要研究方向为光学设计. Email: lxc119@sina.com

收稿日期: 2012-05-11; 修回日期: 2012-07-03

$$\frac{f_2(1-m_2^2)}{m_2^2}dm_2 + \frac{f_3(1-m_3^2)}{m_3^2}dm_3 = 0 \quad (1)$$

将变倍组的焦距取作规划值,即 $f_2' = -1$

本设计在长焦时,变倍组和补偿组位置最接近,为防止在长焦时两组元相碰,以长焦位置作为起点进行计算,设定此时变倍组和补偿组之间的距离为 d_{23l} .

由预先选定的 m_{2l} 计算与之对应的 m_{3l} .

$$m_{3l} = \frac{f_3'}{f_3'(1-m_{2l}) - d_{23l} + f_3'} \quad (2)$$

$$b = -\frac{f_2'}{f_3'} \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2l}} + m_2 - m_{2l} \right) + \left(\frac{1}{m_{3l}} + m_{3l} \right) \quad (3)$$

求补偿组满足变焦过程的 m_3

$$m_3 = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4}}{2} \quad (4)$$

m_3 一般选取大于 -1 段,因为小于 -1 段为最慢变焦.

计算变倍组的移动量 q 和补偿组的移动量 Δ

$$q = f_2' \left(\frac{1}{m_2} - \frac{1}{m_{2l}} \right) \quad (5)$$

$$\Delta = f_3' (m_3 - m_{3l}) \quad (6)$$

变倍组和补偿组之间的距离为

$$d_{23} = d_{23l} - q + \Delta \quad (7)$$

按上述公式进行计算,一直计算到技术指标的变焦比 Γ 为止.

$$\Gamma = \frac{m_{2l}m_{3l}}{m_2m_3} \quad (8)$$

前固定组焦距 f_1' 由式(9)计算

$$f_1' = m_{12l} + \frac{f_2'(1-m_{2l})}{m_{2l}} \quad (9)$$

系统总长 L 为

$$L = 1 + |q| + f_2'(1-m_{2l}) + f_3' - \frac{f_3'}{m_{3l}} \quad (10)$$

2 光学设计

2.1 技术指标

焦距范围:26~34 mm

适用芯片尺寸 0.65 英寸数字微镜器件(Digital Micromirror Device, DMD)

分辨率:1.3 k,相当于 44.6 线对/毫米的尼奎斯特频率.

F -number:小于 $F2.0$.

外形尺寸:小于 $165 \times \Phi 100$ (长度 \times 口径)

2.2 以往经典镜头结构举例

如图 2,为一款经典 35 mm 放映镜头^[11]的结构示意图,表 1 为其结构参量.该镜头视场角为 $33.58^\circ \sim 27.74^\circ$,本文的镜头视场角(由 2.1 节所述

技术参量算得)为 $36.2^\circ \sim 28.3^\circ$,焦距为 45~55 mm,变倍比为 1.22:1,本文镜头变倍比应为 1.3:1,以上参量较为接近.需要改进的地方如下:1)该经典镜头结构中,共有 4 对胶合镜片,不利于高温环境下的使用,需减少.2)该经典镜头 $F\#$ 为 3.8,与小于 $F2.0$ 的要求相距甚远,另外该镜头由 11 片透镜组成,片数略多,二者会对镜头亮度构成较大影响.

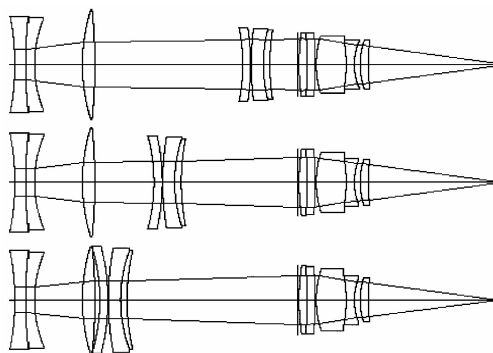


图 2 35 mm 变焦放映镜头的结构
Fig. 2 The structure of 35 mm zoom lens

表 1 35 mm 变焦放映镜头结构参量

Table 1 Structure parameter of 35 mm zoom lens

Surf.	Radius	Thickness	Glass
1	-117.484	5.076	N-LAK7
2	211.714	3.807	SF1
3	56.905	22.496	
4	87.145	5.777	N-LAF2
5	-266.938	69.256-35.31-69.256	
6	-81.985	3.807	F5
7	-100.714	0.254	
8	133.881	5.703	N-LAK12
9	65.974	3.023	SF1
10	101.445	79.761-46.321-12.92	
11	Stop	0.508	
12	108.23	3.807	BASF2
13	-188.319	3.807	N-LAK12
14	-195.522	0.508	
15	43.876	14.041	N-LAK14
16	-60.773	3.927	SF1
17	27.489	2.673	
18	32.271	3.807	N-LAK14
19	71.532	60.96	

2.3 结构的建立和像差设计

根据上述求高斯解的思路建立起初始光学结构,针对五个分布均匀的焦距位置进行设计,其焦距和相应视场角如表 2.

对于电影放映镜头,应重点校正球差、色差,以及影响清晰度的彗差和象散,畸变应控制在 2% 以内.设计过程中应尽量提高相对孔径,减少玻璃片数,以提高亮度,简化结构.

表 2 选取五个位置的焦距和视场角

Table 2 Focal length and field angle of five position

Conf.	E. F. L./mm	FOV/(°)
Config1	26	36.2
Config2	28	33
Config3	30	31.6
Config4	32	29.1
Config5	34	28.3

设计过程中采取了先分后合的设计方法^[9-10],即将变倍组、补偿组先各自校正像差,再组合在一起,以保证变焦组元的移动不会引起太大的像差.变倍组和补偿组应尽量简化,以便于移动.后固定组的像差尽量要与前面累计像差等量而反向.由于后固定组的责任比较大,除了负责把整个系统的像差校正到最佳状态,还要起到调整后工作距离和光学筒长的作用,因此后组是该系统中最为复杂的部分,由一对双胶合透镜和两片单透镜组成.为保证照度不变,必须使相对孔径保持不变,需将孔径光阑设置在后固定组前方,与后固定组固连.在长焦和短焦位置,前组的 h_p 和 h 都为最大值,由式 $c_2 = \sum_{i=1}^n h h_p \frac{\varphi}{v}$ 可知,前组对垂轴色差的影响最大,可通过调整前组系统的玻璃材料、光焦度分配来消倍率色差.

最终,设计了一个相对孔径为 1/1.7,由九片玻璃透镜组成的变焦放映镜头,图 3 为长焦、中焦、短焦三个位置的结构示意图,前固定组为一片正透镜,变倍组由一对双胶合透镜组成,补偿组由双分离的负正透镜组成,后固定组由四个透镜组成.

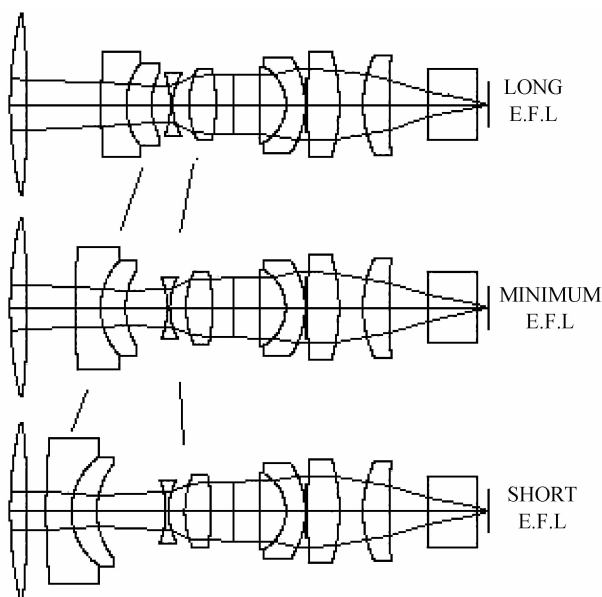


图 3 变焦镜头结构图
Fig. 3 The structure of zoom lens

3 凸轮曲线的设计

若完全按照高斯理论计算出凸轮曲线,则像质

不能达到最佳效果,若只采取插点后由光学设计软件自动优化计算,则会使曲线失去控制,于是在按照高斯理论计算的点位上,利用光学软件进一步优化,可以得到以上二者兼具的优点.在已经优化好的五个焦距位置的基础上,用插值法选取变焦过程中 200 个焦距位置的数据作为采样点,如表 3 所示.

表 3 凸轮曲线的取样点

Table 3 Sample of cam curve

Zoom group position	Compensating group position	The Rotation angle of cam
6.755	54.186	0
6.864	54.196	0.8
6.982	54.206	1.6
7.091	54.215	2.4
7.200	54.224	3.2
7.317	54.234	4
...
26.885	55.878	150.4
26.989	55.887	151.2
27.101	55.896	152
27.205	55.905	152.8
27.31	55.914	153.6
27.422	55.923	154.4
27.526	55.932	152.2
27.630	55.941	152.8
27.742	55.950	153.6
27.846	55.959	154.4
27.950	55.968	155.2
28.062	55.977	156
28.166	55.986	156.8
28.270	55.994	157.6
28.382	56.004	158.4
28.486	56.013	159.2

根据以上这些点拟合出变倍组和补偿组的凸轮曲线,如图 4 所示.求出曲线方程,经试算,将曲线拟合为三次方程时,三次项已经小于机械加工的误差

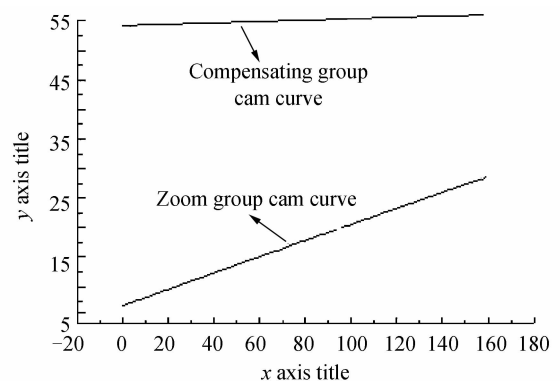


图 4 运动组分的凸轮曲线
Fig. 4 The cam curve of moving groups

允值,可忽略不计,因此该曲线拟合为二次方程即可.求得变倍组的凸轮曲线方程为

$$y = 6.75543 + 0.13981x - 2.08032E - 5x^2 \quad (11)$$

补偿组的凸轮曲线方程为

$$y=54.18695+0.1175x-1.75855E-6x^2 \quad (12)$$

图 4 为变倍组和补偿组的凸轮曲线图,其中 x 轴为凸轮转过的角度, y 为补偿组和变倍组的坐标,这里以前固定组的最后一块玻璃透镜作为起点.

在算得的凸轮曲线上,分别选取 20 个点,代入光学结构中检验,可证实像面得到了比较准确的补偿,成像质量良好,焦距变化均匀、快速,图 5 为焦距变化曲线图.其中, x 轴为凸轮转过的角度, y 轴为焦距值.

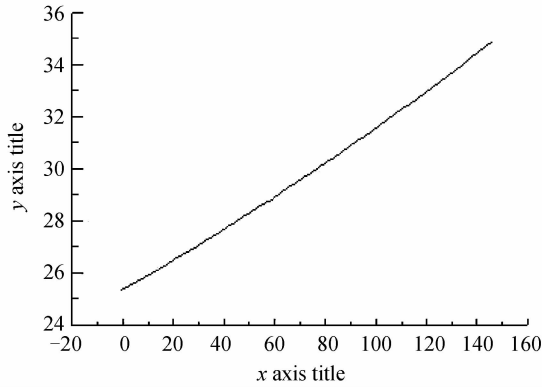


图 5 焦距变化图
Fig. 5 The change of focal length

4 设计结果及像质评价

本文最终设计了一个四组九片式的结构,全部采用球面玻璃透镜.表 4 为该系统的结构参量列表,该镜头与之前列举的 35 mm 经典变焦镜头相比,除视场角、变焦比略有增大外,孔径从 $F3.8$ 提高为 $F1.7$,镜片从 11 片缩减为 9 片,胶合镜片由 4 对减少到 2 对,玻璃更为廉价,透镜形状也更易加工.因

此,该镜头在亮度、成本、工艺性及使用性能方面都得到了一定程度的优化.

表 4 镜头结构参量

Table 4 Lens structure parameters

Surf.	Radius	Thickness	Glass
1	155.142	6.778	H-K9L
2	-317.673	6.756-18.285-28.486	
3	294.272	10	H-QK3L
4	26.599	10	H-ZF7LA
5	28.268	27.431-16.424-7.527	
6	-33.033	1	BAF6
7	23.889	6.542	
8	34.222	10.461	H-LAK3
9	-71.032	9.017-8.389-7.188	
10	Stop	10.622	
11	-188.477	10	H-QK3L
12	-17.07	7.614	H-ZF52A
13	-33.939	0.2	
14	201.812	13.25	H-ZK10
15	-71.81	9.4	
16	45.857	10	H-ZK11
17	191.606	15.166	
18	Infinity	20	H-K9L
19	Infinity	4	

在长焦时,两运动组元间距最小,为 7.5 mm,已留有足够空间.系统总长为 158 mm,全口径为 71 mm.相对口径为 1/1.7.由于篇幅关系,这里只给出短焦、中焦、长焦三个焦距位置的像差情况,如图 6 和图 7 所示.畸变保持在 2%以内,在 44.6 线对/毫米的空间频率时,轴上调制传递函数分别为 0.68、0.7、0.68,轴外全视场的子午调制传递函数分别为 0.46、0.5、0.38,弧矢调制传递函数为 0.6、

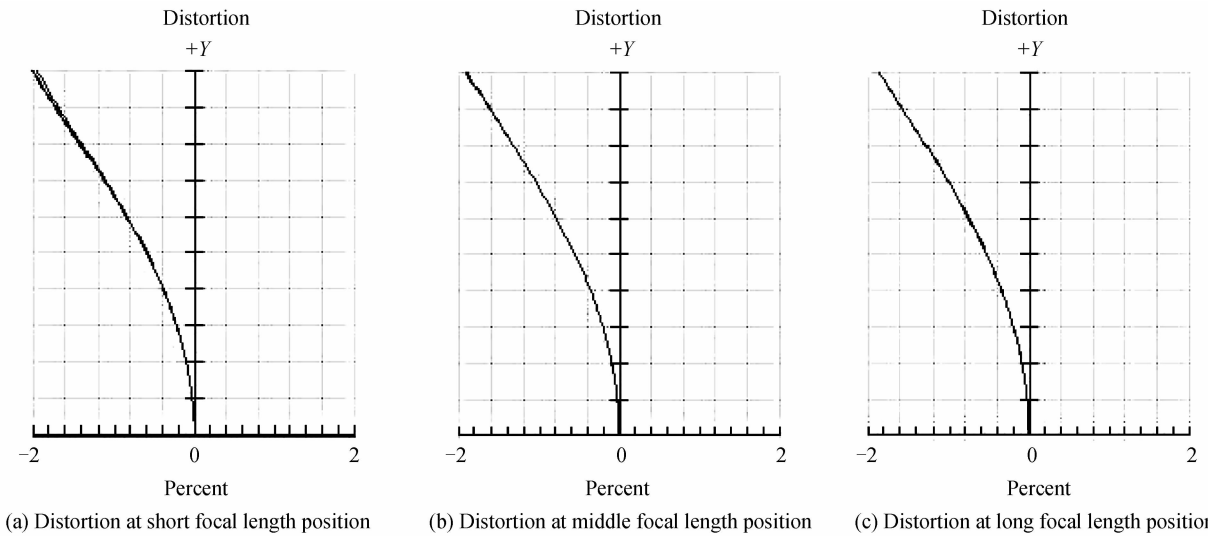


图 6 不同焦距下的畸变
Fig. 6 Distortions at different focal lengths

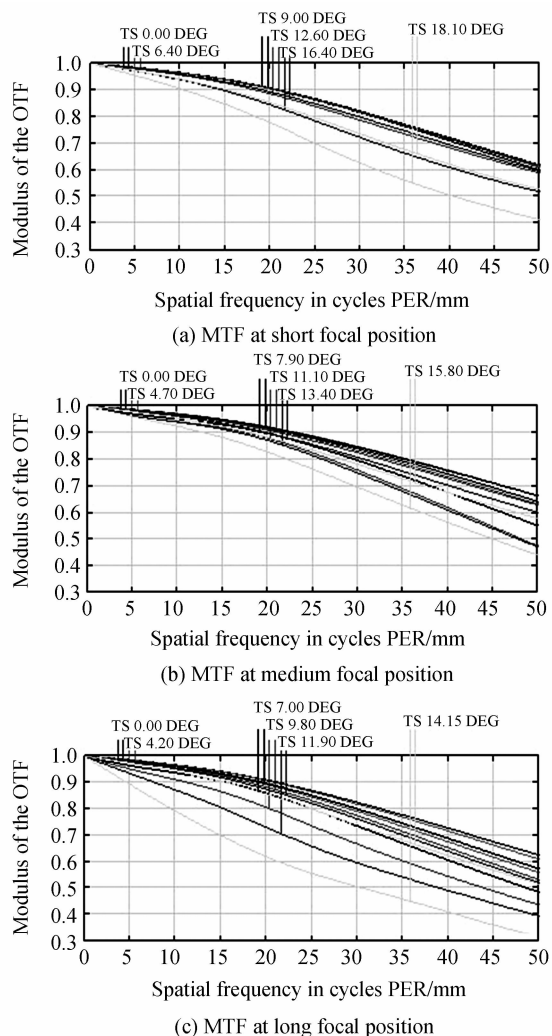


图7 不同焦距的调制传递函数

Fig.7 MTFs at different focal lengths

0.65、0.58,完全满足成像要求。

5 结论

本文设计了一个四组九片式的电影变焦镜头,全部采用球面玻璃透镜,设计了平滑的凸轮曲线,在44.6线对/毫米的空间频率时,轴上调制传递函数高于0.68,轴外全视场的子午方向调制传递函数高

于0.45,弧矢方向调制传递函数高于0.58.畸变小于2%,色差小,亮度高,完全满足影院的放映需求,同时又能根据影院的不同放映距离,将画幅调整到合适的尺寸.镜头结构简单、紧凑,具有较好的工艺性,此电影变焦镜头的成功开发对于国内电影领域具有重要意义。

参考文献

- [1] LIU Xiao-chan, CHEN Chen. Design of 3-DLP digital projection lens with short focal length[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, **31**(Sup): 38-42.
- [2] 刘宵婵,陈琛.基于3-DLP数字投影机的短焦镜头设计[J].*应用光学*,2010,**31**(Sup): 38-42.
- [3] YANG Feng-he. DLP technology and DLP based Projection display application[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005: 25.
- [4] 杨凤和. DLP技术及其投影显示应用研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2005:25.
- [5] CHENG Ke, ZHOU Si-zhong. Design of short focal-length. Zoom system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1825-1828.
- [6] 程珂,周泗忠.短焦距变焦物镜设计[J].*光子学报*,2005,**34**(12):1825-1828.
- [7] LU Kai-chang. Birmingham (GB), Ernesto M. Rodriguez, Jr, Austin, TX(US). Projection Lens and display device: US, 7, 123, 426 B2[P]. 2005-10-27.
- [8] YAMAMOTO C. Masaru Amano(JP). Projection zoom lens system and projection type display apparatus: US, 7, 715, 111B2[P]. 2009-9-3.
- [9] 陶纯堪.变焦距光学系统设计[M].北京:国防工业出版社,1988:63-81.
- [10] GAO Ming, DUAN Jing. Optical design of high-magnification digital zoom lens[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, **30**(1):1-5.
- [11] 高明,段晶.高变倍比数码镜头设计[J].*应用光学*,2009,**30**(1):1-5.
- [12] 萧泽新.工程光学设计[M].北京:电子工业出版社,2003:138-139.
- [13] 袁旭沧.光学系统设计[M].北京:科学出版社,1983:97-108.
- [14] BAI Qing-lan, MIAO Xing-hua. Achromatized design of near UV-visible wide2angle objective[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(11): 1331-1335.
- [15] 白清兰,苗兴华.消色差的近紫外-可见光广角物镜设计[J].*光子学报*,2004,**33**(11):1331-1335.
- [16] 莱金 M. 光学系统设计[M]. 周海亮,周华君,等,译. 4版.北京:机械工业出版社,2009:382-384.

Design of Zoom Cinema Projection Lens

LIU Xiao-chan, CHEN Chen, LI Wei-shan, ZHANG Yu, LIU Hong-jun

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

Abstract: To satisfy the projection demand of cinemas with different size, based on mechanical compensation theory, a digital cinema projection lens is designed, and the cam curve is provided. The lens consists of four groups of nine glass lenses, and all the lens surface is spherical. Through comparing with the classical projection zoom lens, the character of the lens designed in the article is introduced clearly. Focal length is 26~28.3 mm, the relative aperture is 1/1.7, the total length is 158 mm, and the caliber is 71 mm. Distortion is less than 2%, at the frequency of 44.6 lp/mm, the axile MTF is higher than 0.68, the meridian MTF of the largest field is higher than 0.38, and the saggital MTF of the largest field is high than 0.58. The design results show that this lens has the merits of high brightness, steady image surface, compact structure and easy to process.

Key words: Optical design; Zoom projection lens; DMD chip