

文章编号:1002-2082(2006)04-0264-04

变焦距投影光学系统中的远心光路设计

梅丹阳, 焦明印

(西安应用光学研究所, 西安 710065)

摘 要: 介绍了含有棱镜系统的数字光处理器(DLP)投影仪连续变焦距远心镜头的设计。通过对 DLP 投影镜头与数字微反射镜器件之间的全反射棱镜系统进行分析,发现采用像方远心光路设计方法,可使投影系统产生的杂光大大减少。进一步研究变焦距系统远心光路的结构特征,得出了使系统在整个变焦过程中都处于远心位置的光阑轴向位移方程。借助给光阑固联一个透镜(与补偿组共同补偿变倍组)所产生的像面移动,得到了变焦曲线平缓、光焦度分配均匀且成像质量较好的投影镜头。

关键词: 远心光路;变焦距镜头;投影光学系统;光学设计

中图分类号:TN202

文献标志码:A

Design of telecentric beam path for zoom projection optics

MEI Dan-yang, JIAO Ming-yin

(Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: The continuous telecentric zoom lens for a digital light processor (DLP) projector with prisms is presented. The total internal reflection (TIR) prisms between the zoom lens and the digital micro-mirror device (DMD) are analyzed. To obstruct the false light, it is preferable that the projector zoom lens has a telecentric incident side. To study the structure of telecentric beam path for zoom lens system, the axial displacement equation for the stop was deduced, which keep the system telecentric in all zoom position. A thin lens group fixed with the stop shares the power of the others and makes the cam curve smooth.

Key words: telecentric beam path design; projection zoom lens; projection optics; optical design

引言

投影镜头的主要作用是将数字光阀上的图像投影到大屏幕上。针对 DLP 投影仪的数字光阀 DMD,为使屏幕上得到的图像质量较高,分析了 DLP 投影镜头应满足的性能,确定了投影镜头设计方案。在 DLP 投影系统中,将经处理的视频信号加载于 DMD 上,DMD 把经全反射棱镜的入射光反射到光学镜头,光学镜头把图像放大投射到屏幕上。根据光路可逆性,设计投影镜头时,把屏幕作为物,DMD 作为像。但因全反射棱镜的引入,大大加

长了投影镜头与像面之间的距离。而后截距^[1]、棱镜组各面之间所成的角度对投影镜头的像方出射光线的角度要求比较严格,为使棱镜系统不阻碍正常光线并避免杂散光通过,主光线与光轴的夹角要设计得尽量小,即主光线在像方与光轴近似平行,这可用像方远心光路来实现。

1 光学设计

1.1 常见结构形式

常见的投影变焦距系统一般主要由以下 4 部

收稿日期:2006-02-16; 修回日期:2006-03-02

作者简介:梅丹阳(1979—),女,内蒙古赤峰人,西安应用光学所在读硕士研究生,主要从事光学设计工作。E-mail: meidy205@hotmail.com

分组成:前固定组(L1)、变倍组(L2)、补偿组(L3)和后固定组(L4)。它们分别具有负、正、负、正的光焦度^[2],如图1所示(图中用T和W表示长焦和短焦位置,stop表示光阑)。设L3是变倍组,向屏幕方向做线性运动时,为使像面位置保持不变,L2应向DMD方向作非线性的补偿运动,此时系统由长焦变到短焦位置。若要使这样的变焦距系统具有像方远心光路的特性,就需要在系统中引入孔径光阑(孔径光阑放置在它后面透镜组的前焦面上)。现有投影镜头光阑大多是固定的,在中焦时处于远心位置,长焦和短焦时不是远心光路,这样会使长焦和短焦屏上的对比度降低。

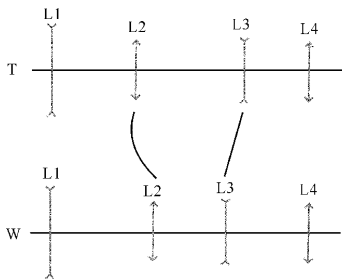


图1 常见的投影变焦距系统

Fig. 1 Familiar projection zoom lens

1.2 远心光路设计方案

若要保证整个变焦过程都是远心光路,可将光阑置于L3的前焦面上,与L3固联,去掉后固定组。其变焦过程见图2所示。这样,其他组元就必须分担更多的光焦度,但因L1的口径很大,不利于像差的校正(因为系统总长是变化的),故不便装调。

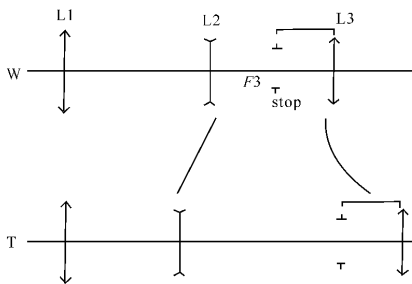


图2 光阑与补偿组固联

Fig. 2 The stop fixed with compensation

为使系统总长不变且口径不至于过大并具有像方远心的特性,采用图3所示(图3中略去了透镜组L1和L2)的结构。把光阑放在第3组透镜之前,

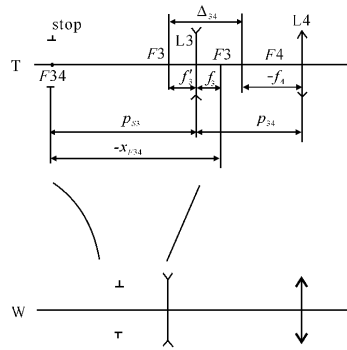


图3 光阑位于系统中间情况

也就是系统的中间位置,此时L3和L4的组合前焦距位置可表示成^[3]:

$$x_{F34} = \frac{f_3 f'_3}{\Delta_{34}} = -\frac{f_3'^2}{\Delta_{34}} \quad (1)$$

式中, x_{F34} 为L3的物方焦点到L3和L4组合的物方焦点的距离; f_3 和 f'_3 为L3的物方和像方焦距; Δ_{34} 为L3的像方焦点到L4的物方焦点的距离。于是即可推算出光阑到第3组透镜L3的距离:

$$p_{S3} = -\frac{f_3 f'_3}{p_{34} - f'_3 + f_4} - f_3 = -\frac{p_{34} f_3 + f_4 f'_3}{p_{34} - f'_3 + f_4} \quad (2)$$

式中, p_{34} 表示L3与L4之间的距离,光阑的运动特性曲线可用它与后固定组L4的距离 p_{S4} 描述:

$$p_{S4} = p_{S3} + p_{34} = -\frac{f_3 f'_3}{p_{34} - f'_3 + f_4} - f_3 + p_{34} \quad (3)$$

2边微分得到光阑与透镜组L4的运动关系:

$$dp_{S4} = \frac{f_3 f'_3 dp_{34}}{(p_{34} - f'_3 + f_4)^2} + dp_{34} \quad (4)$$

对于光焦度为负的薄透镜系统,可近似认为 $-f_3 = f'_3 < 0$,于是有:

$$dp_{S4} = \frac{(p_{34} + f_4)^2 - 2f'_3(p_{34} + f_4)}{(p_{34} - f'_3 + f_4)^2} dp_{34} \quad (5)$$

可以证明:

$$\frac{(p_{34} + f_4)^2 - 2f'_3(p_{34} + f_4)}{(p_{34} - f'_3 + f_4)^2} < 0 \quad (6)$$

对于方程:

$$p_{34}^2 + 2(f_4 - f'_3)p_{34} + f_4^2 - 2f'_3 f_4 = 0$$

设 $A=1$, $B=2(f_4 - f'_3)$, $C=f_4^2 - 2f'_3 f_4$,则

$$B^2 - 4AC = f_3'^2 > 0$$

得: $p_{34}^2 + 2(f_4 - f'_3)p_{34} + f_4^2 - 2f'_3 f_4 < 0$ 有解,

即 $(p_{34} + f_4)^2 - 2f'_3(p_{34} + f_4) < 0$ 有解。

所以,当 $d p_{s4}$ 与 $d p_{34}$ 符号相反时,光阑的移动方向与 L_4 移动方向反向、与 L_2 的移动同向。

1.3 光阑固联透镜

由于光阑与 L_2 的移动方向相同,因此可以在光阑前加一个光焦度与 L_2 性质相同的透镜 L_3 ,如图4 所示。 L_3 用来分担 L_2 的光焦度并可使 L_2 的运动曲线变平缓,而且还可减小光阑后面透镜组的口径。由(5)式得知,此时光阑与透镜组 L_3 共同的运动规律为

$$d p_{35} = \frac{(p_{45} + f_5)^2 - 2f_4'(p_{45} + f_5)}{(p_{45} - f_4' + f_5)^2} d p_{45} \tag{7}$$

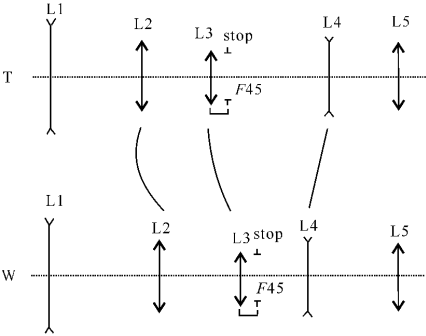


图4 光阑固联透镜

Fig. 4 A lens fixed with stop

这样,整个系统的变焦过程由3 组透镜运动来实现,系统的高斯计算过程和双组联动系统类似,不同的是双组联动系统中 L_2 与 L_4 固联在一起运动, L_3 作补偿运动,所以第2 组和第4 组的移动量满足 $d q_2 = d q_4$ 。在图4 所示系统中, L_4 作线性移动, L_3 的运动取决于 L_4 的运动。令 p_{s5} 为光阑与 L_5 的间距,并注意到第3 组和第4 组透镜的移动量与间距的关系: $d q_3 = d q_s = -d p_{s5}$, $d q_4 = -d p_{45}$,于是可得到 L_3 与 L_4 的运动关系:

$$d q_3 = \frac{(p_{45} + f_5)^2 - 2f_4'(p_{45} + f_5)}{(p_{45} - f_4' + f_5)^2} d q_4 \tag{8}$$

在运动过程中,若要保持像面位置固定不变, L_4 产生的像面偏移需由 L_2 和 L_3 的移动来补

偿^[4],且满足下式:

$$(1 - m_2^2)m_3^2m_4^2d q_2 + (1 - m_3^2)m_4^2d q_3 + (1 - m_4^2)d q_4 = 0 \tag{9}$$

本系统可得出与双组联动系统相同多的未知数个数和方程的个数,仿照双组联动系统,得出系统初始结构,合理选择材料并对像差进行校正,可得到成像质量很好的投影透镜。

2 设计结果

对远心变焦距系统求解,确定透镜组的焦距和运动方式。图5 是用与光阑固联透镜后的变焦距远心系统的结构图(本文给出了由长焦(T)到短焦(W)变化的变焦曲线。此系统物距2 250 mm,光阑口径17.1 mm,第1 组透镜的口径为55 mm;各组的焦距大小分别为 $f_1' = -47.87$ mm, $f_2' = 134.66$ mm, $f_3' = 39.06$ mm, $f_4' = 29.19$ mm,

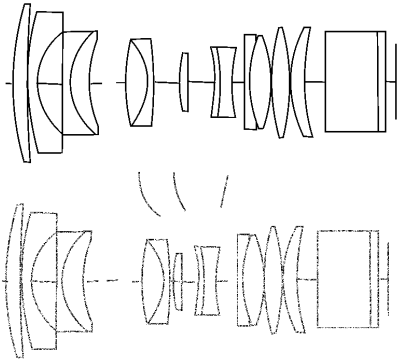


图5 投影变焦距远心系统

Fig. 5 Telecentric zoom lens system

$f_5' = 24.77$ mm。表1 列出系统变焦过程中的主要参数。图6 和图7 分别是系统长焦(T)、中焦(M)、短焦(W)时的传递函数曲线和畸变曲线。可以看出,系统各位置的传递函数都达到了较高的值,畸变也都小于1%,成像质量很好。

表1 各组分参数

Table 1 The parameters of every group

	p_{45}/mm	有效焦距/mm	PNO	视场角/(°)	出瞳直径/mm	出瞳距离/mm
长焦	2.600 27	27.987	2.2	23	1.472E+04	3.026E+04
中焦	3.900 02	25.39	2.1	25	3.689E+07	7.023E+07
短焦	5.200 55	22.90	1.9	28	3.020E+04	5.977E+04

