

球幕投影光学系统的设计与研究

孙 鑫^{1,2} 白加光¹ 王忠厚¹

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 设计了一种飞行训练使用的球幕投影仪光学系统. 系统焦距为 5.5 mm, 相对孔径为 1/4, 全视场角 175°, 光谱范围为可见光波段, 采用了 3 组 10 片的反远距型结构. 与普通投影系统不同之处在于, 该系统在保证大视场的前提下有效地减小了场曲对像质的影响. 给出了球幕结构对场曲影响的定量分析以及较为方便的屏幕半径选择方法. 因全部采用国产玻璃而同时满足了国产化的要求.

关键词 光学系统设计; 球幕; 大视场; 场曲

中图分类号 O439 **文献标识码** A

0 引言

利用 LCD 投影机多样化的信号输入能力, 配合现代计算机技术和相应的软件, 投影屏幕被设计成半球形状的球幕投影演示系统. 这种系统可以展现给飞行员视场较大、纵深感强的空、地背景图案, 达到高效的飞行模拟训练目的. 目前国内市场上能够提供的投影机虽然种类繁多, 但大多数仅局限于对多人的普通投影演示, 针对单人飞行模拟需要的投影系统尚属于空白阶段. 国外虽有类似产品, 但存在价格昂贵, 更换配件困难等诸多不利因素. 考虑到成本及器件维护的缘故, 如要在国内广泛应用球幕投影系统作为飞行训练器材, 急需使之国产化. 由于球幕系统独特的投影模式, 采用的投影物镜的全视场角将接近 170°~180°, 相对于一般镜头的设计难度和加工成本有明显提高, 这也是造成该类系统价格较为昂贵的主要原因. 因此这种大视场投影物镜的自主设计和加工成为球幕投影系统能否实现国产化的关键问题. 通过参考国外成熟的商业产品的技术指标, 本文设计了一类球幕投影光学系统, 拟定其参量为: 焦距为 5.5 mm; 全视场为 175°; 相对孔径为 1/4.

1 结构选择

球幕投影光学系统具有短焦距、大视场的特点, 考虑到实际装配过程中对较大后截距的需要(像面和镜头之间有可能根据需求增加棱镜或倍率镜), 综合这些特征决定采用“反远距型”结构^[1], 如图 1.

反远距结构采用负、正透镜组分离, 负光焦度透镜组作为前组, 正光焦度透镜组作为后组. 可以看

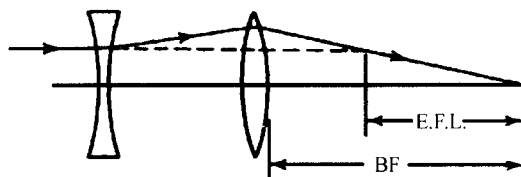


图 1 反远距型系统示意
Fig. 1 Sketch of the anti-telephoto lens

到, 由于负前组的发散作用使得整个光学系统的主面向后移动, 从而获得了比有效焦距更长的工作距离. 通常在有很大视场要求的情况下, 负前组第一面半径尽量弯向后组, 这样不仅有利于像差的校正, 同时也尽可能的保证视场边缘光线进入系统而不发生掠射, 如图 2.

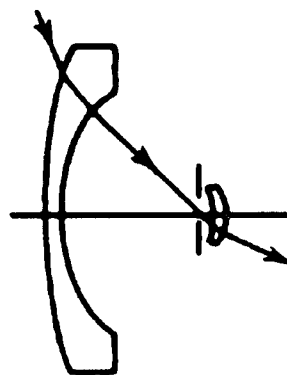


图 2 反远距结构负前组示意
Fig. 2 Sketch of the negative part

正是因为负组在整个系统中承担的光焦度远远大于后组, 所以随视场增加的过程中负前组与视场相关的像差变化剧烈, 尤其是畸变相当严重. 解决的方法只有通过后组复杂化进行补偿, 畸变方面亦可通过软件进行校正处理^[2].

2 设计实例

参考国外目前已经投入商业使用的产品

(Elumens 公司研制的 VisionStation 系列), 现拟定投影屏半径 810 mm, 投影物镜的工作距离(第一面顶点到屏幕中心)530 mm. 因为投影物镜是放大系统, 所以在进行光学设计时一般把物像交换后计算, 即就是采用反向光路追迹光线, 这样做的优点是降低了各种像差的数量级, 从而减少软件计算准确度对实际结果的影响.

实际加工中, 这类物镜多采用在前后组之间的空气间隔放置 45° 反射镜的折轴形式, 这样就需要在设计时考虑适当放大前、后组的间隔, 无疑为设计过程增加了难度. 在本设计中努力照顾到了这一需要, 镜头前、后组的间隔达到 38 mm, 无论实际加工中采用折轴或直筒型, 都能满足机械装配的要求, 如图 3.

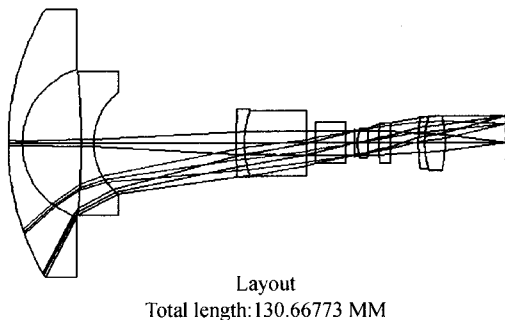


图 3 光学结构
Fig. 3 The optical system

经过像差平衡后, 畸变尽量做到单调变化, 以确保后期采用数据拟合法校正准确度^[2], 像面的畸变小于 3.5%, 空间频率 36 lp/mm(根据光学系统和探测器匹配的原则^[3]通过采用 VisionStation 产品的 LCD 的尺寸及分辨率进行换算得到)时的 MTF 达到 0.75 以上, 如图 4.

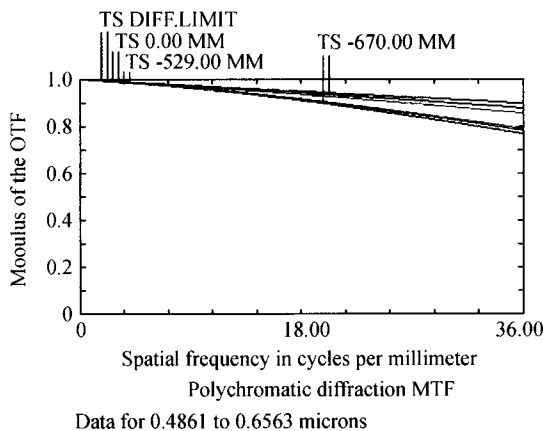


图 4 传递函数曲线
Fig. 4 MTF curve

相对照明可以达到 96% 以上, 这一方面已经超过了大部分同类型国外专利^[4], 更好地满足了投影物镜对像面均匀性的要求.

3 球幕结构分析

3.1 屏幕弯曲与场曲的变化

以上面设计为例, 当保持视场角不变的情况下把屏幕延展成平面时, 发现除场曲和畸变有显著变化之外, 其他像差基本保持不变, 如图 5.

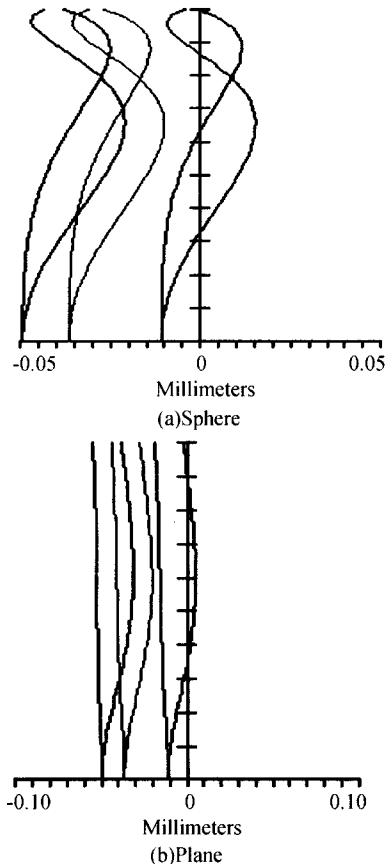


图 5 物面为球面和平面时系统的场曲
Fig. 5 The field curve shift

图 5 显示了物面弯曲前后场曲的变化(由于畸变可通过软件修正, 这里不作详细讨论). 由图 5(a)可以看出, 弯曲后轴外细光束场曲产生正值, 使得子午和弧矢场曲曲线在 0.8 视场相交. 虽然还明显有残余的高级量, 但中心视场和边缘的像质都得到了改善, 说明物面向像面弯曲能够校正初级场曲. 这便是为何在一些大视场的投影系统中, 把投影屏做成具有一定曲率半径的球型屏幕的原因. 显然这样可以通过调整屏幕的曲率半径来更好的与镜头的像面弯曲(场曲)及 LCD 面板曲率匹配以达到最大化改善像质的目的.

匹兹伐场曲是所有光学系统中存在的一种基本场曲, 它和透镜曲率及材料折射率具有明显的线性关系. 所以下面讨论中采用匹兹伐场曲为对象, 这样便于说明物面曲率和匹兹伐场曲变化的关系.

不考虑高级像差的前提下, 物面为平面时光学系统的匹兹伐场曲可由光学计算软件所提供的三级

像差系数得到

$$X'_{p0} = \frac{-\sum S_{IV}}{2n_k u_k'^2} \quad (1)$$

如图6, B 点为垂直于光轴物面边缘物点, 理想成像的情况下像点为 B' 点. 假设光学系统相对孔径较小, 子午、弧矢场曲曲线基本重合, 像散可以认为是零, 匹兹伐场曲即可被认为系统场曲. 物面向

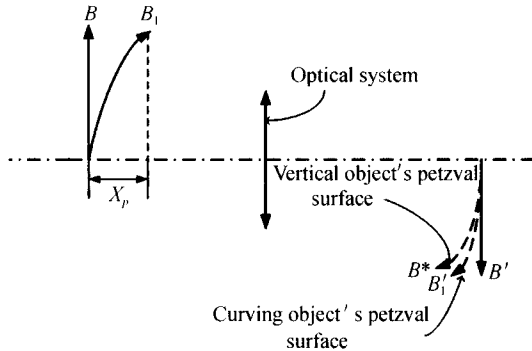


图6 匹兹伐表面前后变化示意

Fig. 6 The changing of the Petzval surface

像面方向弯曲后, 宽光束和细光束场曲均变为负值, 相应的匹兹伐表面由 B^* 移动至 B_1' . 将物面曲率半径所决定的矢高看作附加的场曲量, 用 X_p 来表示. 该附加量经过系统放大后在像方产生的场曲量用 X'_p 表示. 假设系统垂轴放大率为 β , 根据光学系统像差传递的原则, 它们的关系式为

$$X'_p = \beta^2 X_p \quad (2)$$

明显地, 当物面弯向像方时产生的附加场曲对物面为平面时的原始场曲进行了补偿, 此时系统的总场曲 $X'_{p总}$ 用式(3)表示

$$X'_{p总} = X'_p + X'_{p0} = \beta^2 X_p + X'_{p0} \quad (3)$$

为验证以上结论, 用上面给出设计为例进行了验算.

物镜的工作距离 530 mm, 屏幕半径 810 mm, 这时系统初级场曲可以由式(1)解出

$$X'_{p0} = \frac{-\sum S_{IV}}{2n_k u_k'^2} = \frac{-0.002859}{2 \times 0.0169} = -0.0846 \text{ mm}$$

又因屏幕高度为定值可以得到相对应的矢高, 代入式(2)得

$$X'_p = \beta^2 X_p = 0.0495 \text{ mm}$$

将屏幕伸展成平面后, 将得到的三级场曲系数代入式(1)得

$$X'_{p0平面} = \frac{-\sum S_{IV}}{2n_k u_k'^2} = \frac{-0.004664}{2 \times 0.0169} = -0.1380 \text{ mm}$$

根据式(3)可以得到系统总场曲为

$$X'_{p总} = X'_p + X'_{p0} = -0.138 + 0.0495 = -0.0885 \text{ mm}$$

比较 X'_{p0} 和 $X'_{p总}$ 的值, 两个结果基本相符, 说明当物平面的尺寸为定值且光栏尺寸不大的情况下, 高级场曲可以忽略不计, 采用弯曲物面后相应的矢

高计算附加场曲的方法是可行的. 物面向像面方弯曲带来的附加场曲对像方场曲起到了补偿作用, 这对改善系统成像质量非常有利.

需要注意的是, 式(3)仅适用于屏幕尺寸固定的情况, 这一条件下随着屏幕半径的减小, 视场增大, 反之视场减小. 依然以本设计为例, 如果将屏幕恢复成平面同时保持视场角不变, 得到的场曲量接近 6 mm, 畸变更是达到 90%, 显然此时边缘视场高级像差不能忽略且为主要的影响因素了. 这也说明了在设计大视场投影系统的工作中, 为保证较大的视场角而采用球形屏幕是非常有效的.

3.2 屏幕半径的选择

根据薄透镜的初级像差理论, 当系统的球差、彗差及像散基本消除后, 主要影响系统成像质量的单色像差便是匹兹伐场曲. 如果把物面作为一定曲率的曲面代入近轴公式, 可以得到像面匹兹伐半径和球幕的曲率半径的关系^[5]

$$\frac{1}{n_k R'_{pk}} - \frac{1}{n_l R_1} = -\sum \frac{n' - n}{nn'r} \quad (4)$$

式中 R'_{pk} 是像面匹兹伐曲率半径, R_1 是球幕的曲率半径. 由此式可直接得到使 $R'_{pk} \rightarrow \infty$ 时 R_1 的值. 但考虑到本系统为大像差系统, 为了照顾到实际结构的合理性及其他像差的平衡, 可以通过列表改变 R_1 的取值并进行比较, 找出补偿像面弯曲的较佳半径值.

表1直观地显示了随着球幕半径的减小, 像面匹兹伐表面向平面变化的趋势. 当半径为 750 mm 时, 系统的畸变由负变正, 所以选择 800~850 mm 之间的一个值作为球幕半径较为合适. 本文所采用的半径 810 mm 就在这一范围之内.

表1 半径间隔取值结果

球幕半径 R_1 /mm	像面匹兹伐 半径 R'_{pk} /mm	传递函数 MTF (36lp/mm)	畸变 distortion/ (%)
3000	-374.9	0.65	-28.5
1500	-429.0	0.70	-24.3
850	-549.3	0.77	-6.2
800	-572.4	0.79	-3.4
750	-600.1	0.76	2.0

4 结论

相比之下, 国外同类产品多为 13 片以上的结构, 而本设计只使用 3 组 10 片也同样达到良好的成像质量, 同时在设计中全部使用了国内生产的玻璃材料, 半径、厚度都通过参考国内加工水平进行了标准化. 可以相信, 球幕投影产品的完全国产化是可以实现的.

参考文献

- 1 Smith, W J. Modern optical engineering, New York: The McGraw-Hill Companies, Inc. 2000. 468~470
- 2 王虎, 苗兴华, 惠彬, 等. 短焦距大视场光学系统的畸变校正. 光子学报, 2001, **30**(11):1409~1412
Wang H, Miao X H, Hui B, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(11):1409~1412
- 3 达争尚, 陈良益. 光电系统的匹配设计. 光子学报, 2003, **32**(6):669~671
- 4 Da Z S, Chen L Y. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(6):669~671
- 5 James "Jay" Kumler, Martin Bauer. Fisheye lens designs and their relative performance. *Proc of SPIE*, 2000, **4093**:360~369
- 6 R. 金斯莱克. 透镜设计基础, 梁伟生译. 北京: 机械工业出版社, 1985. 212~214
- 7 Rudolf Kings Lake. *Lens Design Fundamentals*. Beijing: China Machine Press, 1985. 212~214

Design and Study of the Dome-screen Projector Optical System

Sun Xin^{1,2}, Bai Jianguang¹, Wang Zhonghou¹

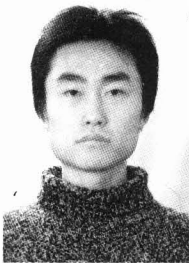
¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

² Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

Received date: 2006-01-19

Abstract An optical system of Dome-screen projector which plays important roll in the pilot-training process was proposed. The lens system adopted the Reverse-Telephoto configuration which had an effective focal length of 5.5mm, an F-number of F/4, a field of view of 175°, and a working wavelength in the range of visible spectrum. A discussion about the relationship between the screen radius and the field curve was presented to explain why this system had an advantage in reducing the field curve. A relatively convenient method of choosing the appropriate screen radius was given at the end of the discussion.

Keywords Optical system design; Dome-screen; Large field of view; Field-curve



Sun Xin was born in 1980, and received his bachelor's degree from the Physics Department of the Northwest University in 2001. From then on, he has been working in the Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics (XIOPM) of Chinese Academy of Sciences. Now he is a master candidate in the Spectra Imaging Technique Lab of XIOPM. His research interest focuses on optical design.