

用于中小型飞行模拟器的球带幕投影镜头的光学设计

刘宵婵 陈琛 宋涛 李维善 张歆 高松 杨博

Optical design of spherical zone projection lens for small and medium-sized flight simulator

LIU Xiaochan, CHEN Chen, SONG Tao, LI Weishan, ZHANG Xin, GAO Song, YANG Bo

引用本文:

刘宵婵, 陈琛, 宋涛, 等. 用于中小型飞行模拟器的球带幕投影镜头的光学设计[J]. 应用光学, 2023, 44(1): 30–36. DOI: 10.5768/JAO202344.0101005

LIU Xiaochan, CHEN Chen, SONG Tao, et al. Optical design of spherical zone projection lens for small and medium-sized flight simulator[J]. Journal of Applied Optics, 2023, 44(1): 30–36. DOI: 10.5768/JAO202344.0101005

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0101005>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

小口径双通道球幕投影镜头的设计

Design of small-caliber dual-channel dome screen projection lens

应用光学. 2018, 39(6): 890–895 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0605003>

大孔径变焦投影镜头设计

Design of large aperture zoom projection lens

应用光学. 2018, 39(3): 405–411 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0305001>

大孔径大视场变焦投影镜头设计

Design of zoom projection lens with large aperture and wild view

应用光学. 2018, 39(3): 412–417 <https://doi.org/10.5768/JAO201839.0305002>

大视场反射式施密特光学系统设计与检测

Optical design and detection for reflective Schmidt system with large field of view

应用光学. 2020, 41(2): 265–269 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0201005>

新型LED太阳模拟器光学系统设计及仿真

Design and simulation of optical system for novel LED solar simulator

应用光学. 2019, 40(5): 882–886, 928 <https://doi.org/10.5768/JAO201940.0505004>

新型LED太阳模拟器光学系统设计及仿真

Design and simulation of optical system for novel LED solar simulator

应用光学. 2020, 41(1): 170–175 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0105003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2023) 01-0030-07

用于中小型飞行模拟器的球带幕投影镜头的光学设计

刘宵婵, 陈 琛, 宋 涛, 李维善, 张 歆, 高 松, 杨 博

(秦皇岛视听机械研究所有限公司, 河北 秦皇岛 066000)

摘 要: 针对现有沉浸式飞行模拟器进一步小型化和低成本化的需求, 设计了一款应用于中小型飞行模拟器的球带幕投影镜头。论文确定了投影方案中各部件(球带幕、投影机、投影物镜)的关键参数, 设计的球带幕投影镜头具有 172° 的视场角和 $6:1$ 的反远比, 将一台装有该镜头的投影机置于银幕上沿就可以将画面投满整个球带幕。文中给出了大视场、大反远比光学系统的构造方法, 对大视场非相似成像系统中的畸变、场曲和相对照度进行了分析和讨论, 并给出了改善照度均匀性的有效途径。该镜头以 8 片透镜的低成本结构满足了 4 k 分辨率的高质量投影需求, 在奈奎斯特频率 185 lp/mm 处全部视场的 MTF 值均达到了 0.4 以上, 且具有良好的工艺性。

关键词: 飞行模拟器; 光学设计; 反远比; 大视场; 投影镜头

中图分类号: TN202; O439

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202344.0101005

Optical design of spherical zone projection lens for small and medium-sized flight simulator

LIU Xiaochan, CHEN Chen, SONG Tao, LI Weishan, ZHANG Xin, GAO Song, YANG Bo

(Qinhuangdao Audio-Visual Machinery Research Institute Co., Ltd., Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: To meet the needs of further miniaturization and cost reduction for existing immersive flying simulator, a spherical zone projection lens for small and medium-sized flight simulator was designed. The key parameters of each component (spherical zone, projector, projection lens) in the projection scheme was determined. The designed lens has a field of 172° and inverted-telephoto ratio of $6:1$, put a projector with the designed lens on the screen, and the whole screen would be fully projected. The construction method of optical system with large field of view and inverted-telephoto ratio was provided, the distortion, field curvature and relative illumination in large field nonsimilar imaging systems were analyzed and discussed, and the effective method of improving the illumination uniformity was also presented. The proposed lens meets the high-quality projection requirements of 4 k resolution with a low-cost structure of 8-piece lens, and its MTF values of all the fields are higher than 0.4 at the nyquist frequency of 185 lp/mm , which has good workability.

Key words: flight simulator; optical design; inverted-telephoto ratio; large field of view; projection lens

引言

近年来, 飞行模拟器已经成为航空航天领域广泛使用的现代化训练设备, 为飞行员提供了安全、经济、高效的仿真训练, 飞行模拟训练及考核也成为飞行员在驾驶真实飞机之前必不可少的训练步骤。飞行员在训练过程中接收到的视觉信息全部

来源于视景系统^[1-2], 并以此做出及时正确的判断, 故视景系统的准确性和视觉效果直接影响着模拟器的综合性能, 并最终影响着训练效果。

视景系统由图像源和光学成像系统两部分组成。图像源是模拟器需要显示的机场跑道、建筑物等舱外景象^[3]的内容, 光学成像系统则是使这些

收稿日期: 2022-04-25; 修回日期: 2022-05-30

基金项目: 2019 年度河北省技术创新引导计划项目科技冬奥专项 (19975707D)

作者简介: 刘宵婵 (1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事成像光学方面的研究。E-mail: liuxiaochan2007@163.com

景象得以显示的系统。目前, 光学成像系统主要分为实像、虚像及头盔 3 种方式, 本文主要针对实像方式展开研究, 即通过投影方式把舱外景象投射出来。目前, 鲜有文献专注于视景系统中投影光学系统的研究, 已发表的文献^[4-6]为了获得较强的沉浸感, 采用了尺寸较大的球幕 (半径 3.5 m~4.5 m), 造价高, 对场地条件要求高, 在训练效率、灵活性和经济性方面有所欠缺。文献^[7]和文献^[8]采用了单机位的小形球幕投影方案, 球幕半径仅为 0.8 m, 还需在最佳观看位置的球心处放置投影机, 且像素利用率低, 使用效果不佳。为解决上述问题, 本文设计了一款球带幕投影镜头, 镜头放置于球带幕上沿(或下沿)即可, 使单机位具有高像素利用率率的中小型球带幕投影方案得以实现, 在减小体积的同时, 提供了较强的沉浸感。

1 总体投影方案设计

一般情况下, 民用飞行模拟器对视场的基本要求为: 水平方向视场角不小于 150° , 垂直方向视场角不小于 40° 。本文采用半径为 2 m 的球带幕, 如图 1 和图 2 所示, 人眼位于球心处, 球带幕在水平方向相对于人眼的张角为 180° , 在垂直方向相对于人眼的张角为 85° 。这样既可以获得较强的沉浸感, 体积也不会过大, 符合本系统的设计初衷。球带幕采用复合材料, 在球带幕表面涂覆具有光学性能的涂料, 在加工工艺上严格控制球幕尺寸, 避免出现变形等缺陷。

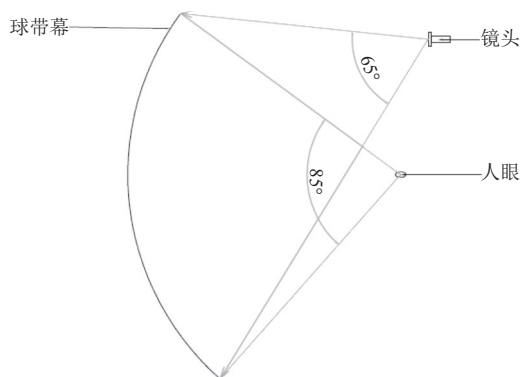


图 1 垂直方向投影光路图

Fig. 1 Optical path of projection in vertical direction

现有球幕投影采用的方案包括多台拼接方案和中心单机位方案。多台拼接方案需要使用多台投影机, 机器占用较多空间, 且需通过融合技术实现, 调试及维护过程繁琐。中心单机位方案^[9], 即镜头置于球心处, 其到球幕边缘各点的视场角一

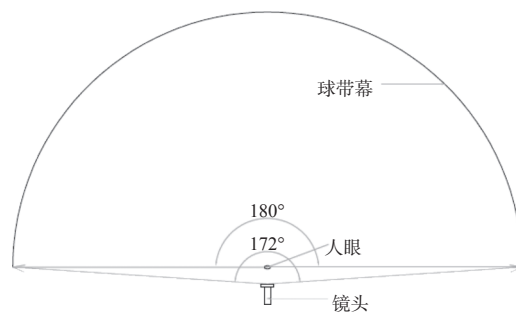


图 2 水平方向投影光路图

Fig. 2 Optical path of projection in horizontal direction

致, 约 180° , 那么若使球幕上投满图像, 则在像素利用率最高的情况下, 芯片端与整个球幕共轭的区域应为以芯片短边^[10]为直径的圆, 此时的像素利用率仅能达到 41%~49%, 会造成像素和光通量浪费严重, 且投影机需置于球幕中心, 占据了最好的观影位置, 也易出现光线被遮挡的现象。故本文提出了单机位偏轴投影方案, 原理如图 3 所示, 即将一台投影机置于球带幕上沿(或下沿)。针对该方案设计的球幕投影镜头以芯片长边为像高, 芯片上参与成像的区域如图 4 所示。可将最高像素利用率提高至 75%~90%, 且球幕空间内不存在遮挡问题。本方案总体设计参数指标如表 1 所示。

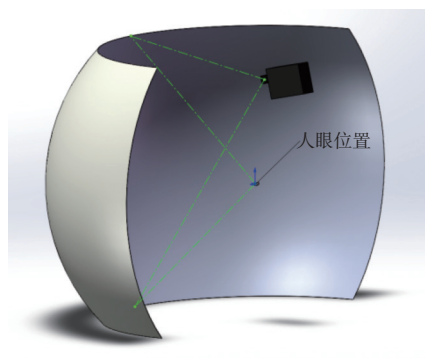


图 3 投影系统效果图

Fig. 3 Effect diagram of projection system

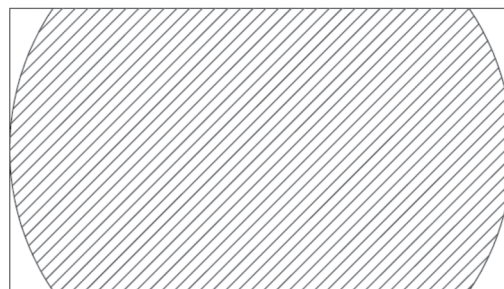


图 4 芯片成像区域

Fig. 4 Diagram of chip imaging area

表1 系统参数

Table 1 Parameters of system

参数	值
水平视场角/(°)	180
竖直视场角/(°)	85
球幕半径/m	2
亮度/f _l	≥6.0
分辨率/arcmin/pixel	≤4.5

2 投影机引擎类型及关键参数的选取

2.1 投影机技术类型选取

在选择投影机时主要考虑投影机的光学引擎^[11]类型,及其亮度、分辨率、对比度这几个关键参数。目前主流投影机主要包括3LCD, DLP, LCOS这3种技术类型。3LCD型投影机价格低廉,但对对比度和分辨率较低,由于看得见像素结构,会有隔着窗子看图像的感觉,且防尘较差,用久了色彩会偏黄,故在模拟器中一般不采用该类型投影机。DLP技术又分为单DMD芯片技术和3DMD芯片技术,单DMD芯片技术投影机具有高对比度、画面细腻、小尺寸、高均匀性、价格低等特点,是高质量中小型投影系统经常采用的投影机。3DMD芯片技术投影机在成像质量方面更胜一筹,但体积大、价格高,一般只在大型工程中使用。LCOS型投影机在色彩、亮度、光效率和分辨率方面都有较好地表现,但黑白对比度不佳,目前仅有2个日本品牌的投影机采用了此项技术,局限性较强。因此本文选取单DMD芯片技术投影机。

2.2 投影机关键参数的确定

亮度计算公式为

$$L_{\text{screen}} = L_{\text{projector}} \times \tau \times \gamma \times T \times \eta / \pi S \quad (1)$$

式中: L_{screen} 为屏幕亮度; $L_{\text{projector}}$ 为投影机亮度,采用工程中应用较多的英制亮度单位,即f_l(英尺朗伯),1f_l = 3.426 cd/m²; τ 为投影机光输出的利用率,典型值为0.8; γ 为屏幕增益,典型值为0.7; T 为镜头透过率,按0.7计算; η 为该方案下的芯片利用率,约为0.8; S 为球带幕面积,约为17 m²。

由以上条件可以计算得出,若亮度达到6 f_l,则投影机亮度需达到3 500 lx以上。

竖直方向的平均像素分辨率为

$$APR = \frac{\theta \times 60}{H} \quad (2)$$

式中 θ 为人眼在竖直方向对幕的张角,约为85°。

当平均像素分辨率 APR 达到4.5 arcmin/pixel^[4]时,可计算得到竖直方向的像素数 H 至少为1 133个。

水平方向的平均像素分辨率为

$$APR = \frac{\omega \times 60}{w} \quad (3)$$

式中 ω 为人眼在水平方向对幕的张角,约为180°。当平均像素分辨率 APR 达到4.5 arcmin/pixel时,可计算得到水平方向的像素数 ω 至少为2 400个。

综合考虑,本文选择一款基于单DLP芯片技术的工程投影机,其亮度为5 000 lx,分辨率为4 k(3 840×2 160 pixels),芯片尺寸为11.94 cm(0.47英寸)。

3 投影物镜设计

3.1 参数的确定

由于芯片尺寸为5.85 mm×10.4 mm,将镜头像圆直径设定为芯片长边尺寸10.4 mm,光学分辨率,即镜头MTF值为 $\frac{3840/2}{10.4} = 185$ (lp/mm)。镜头的具体参数指标如表2所示。

表2 镜头参数

Table 2 Parameters of lens

参数	值
波长/nm	430–680
半像高/mm	5.2
焦距/mm	4.03
全视场角/(°)	86×2
$F\#$	2.2
各视场MTF值(@185 lp/mm)	≥0.4
倍率色差/pixel	≤1/2
镜片口径/mm	≤80
后工作距/mm	>25

3.2 镜头设计

该镜头属于鱼镜头,由于投影机光学引擎中存在体积较大的分色合色棱镜,故镜头需要较长的后工作距。该镜头的设计难点主要是满足大视场、大反远比(后工作距/焦距)、高分辨率,以及照度均匀度等指标要求,此外,畸变和场曲也需要采用不同于常规系统的方法进行分析。

关于照度均匀度,现有光学书籍中给出的轴外像点照度公式^[12]为 $E' = E'_0 \cos^4 \omega'$ 。由此可知,轴外点照度随 $\cos^4 \omega'$ 下降,若按此规律,在120°视场处,相对照度就只有6.5%了,与实际情况相差甚远,显然这种计算方法对于大视场非相似成像的情况已

不再适用。文献《物镜像面相对照度计算方法》^[13]中为了排除孔径光阑像差的影响, 从各视场发出的光线在第一面的受照面元开始分析, 通过矢量分析和推导, 得到大视场非相似成像的相对照度计算公式:

$$E_r = \frac{2\cos\theta_\omega |x_{s1}^{\omega a}| \sqrt{(y_{t1}^{\omega b} - y_{t1}^{\omega a})^2 + (z_{t1}^{\omega b} - z_{t1}^{\omega a})^2}}{(y_{t1}^{0a})^2} \cdot \left(\frac{f}{L_0}\right)^2 \cdot \frac{1}{\Gamma_{\omega r} \Gamma_{\omega r}} \quad (4)$$

式中: θ_ω 为第一光学面的法线和主光线的夹角; ω 视场主光线与物镜第一曲面的交点坐标为 $(x_{s1}^{\omega a}, y_{s1}^{\omega a}, z_{s1}^{\omega a})$; ω 视场经过孔径光阑上边缘和下边缘的两条特征光线与第一面的交点坐标分别为 $(0, y_{t1}^{\omega a}, z_{t1}^{\omega a})$, $(0, y_{t1}^{\omega b}, z_{t1}^{\omega b})$ 。由此得出新的结论: 在物方视场角、光学共轭条件和结构参数已确定的前提下, 为提高像面相对照度, 应使第一光学面的法线和轴外视场主光线的夹角足够小, 即可通过改变第一面曲率半径及入射高度来减小夹角, 从而提高照度均匀性。本设计将该角度控制在 67° , 如图 5 所示。此外, 已经得到证实, 提高大视场光学系统相对照度的常用方法包括, 通过引入大量桶形畸变可减小像方视场角, 以及利用像差渐晕使轴外物点成像光束截面尽量增大。

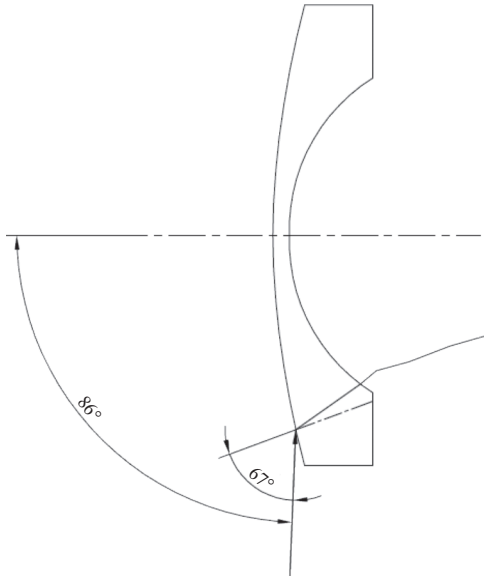


图 5 最大视场入射主光线与第一面法线的夹角

Fig. 5 Angle between main incident light from maximum field of view and the first surface normal line

关于畸变, 相似成像原理不适用于鱼镜头。本系统采用等距投影^[1]成像关系, 即:

$$y_0' = f\omega \quad (5)$$

式中: f 为焦距; ω 为半视场角; y_0' 为理想像高。相对畸变可表示为 $\frac{y' - y_0'}{y_0'} \times 100\% = \frac{y' - f\omega}{y_0'} \times 100\%$ 。等距投影可以产生足够的桶形畸变, 桶形畸变的引入有利于提高相对照度。单纯的畸变并不影响成像清晰度, 只是造成像与物不相似。

关于场曲, 它是球面透镜成像系统的固有像差。与常规光学系统不同的是, 本设计中物面(屏幕)也为球面, 物面的弯曲必然会对系统的场曲造成一定影响。如图 6 所示, 当物面为平面时, 视场边缘物点 Y 对应的理想像点为 Y_0' , 由于存在场曲(假设像散为 0), Y 点实际对应的像点为 Y' 。当物面弯向像面时, 边缘视场物点 Y_1 的像点移至 Y_1' , 即像面更加趋近于近轴像平面。显然, 物面向像面弯曲时, 相当于对场曲进行了一定的补偿, 有利于场曲校正。可将物面曲率半径所决定的矢高作为附加的场曲量, 用 X_p 表示。若垂轴放大率为 β , 则该附加量经系统放大后在像方产生的场曲量可表示为 $X_p' = -\beta^2 X_p$ 。在不考虑高级像差的前提下, 物面为球面的光学系统最终匹兹伐场曲^[7]为

$$X_{p\text{总}}' = X_{p\text{平面}}' - X_p' = X_{p\text{平面}}' + \beta^2 X_p \quad (6)$$

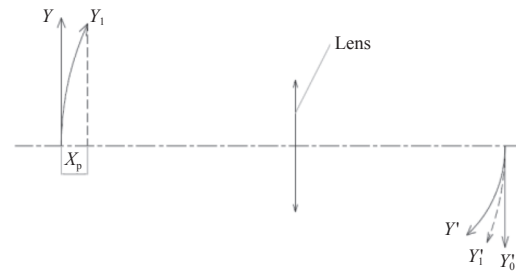


图 6 匹兹伐面随物面曲率的变化图

Fig. 6 Change diagram of Petzval surface with curvature of surface

大视场、大反远比符合反远距结构^[14-16]光学系统的特点, 所以本文选取一个视场接近的反远距结构作为设计起点。如图 7 所示, 初始结构为一个 8 片式光学系统, 该结构中第一镜片形状过于弯曲, 且第二面已接近半球面, 造成了极高的加工难度。另外, 结构中有部分光线溢出, 这是鱼镜头结构中的常见问题。光线入射角度越大越容易发生全反射现象, 从而导致光线溢出, 只有解决了光线溢出问题, 才可称之为一个稳定的鱼镜头结构。首先通过调节敏感面的曲率半径或材料, 使全部视场的光线到达像面, 通过缩放焦距, 得到符合焦距目标值的结构。初始结构属于典型的反远

距型结构,包括具有负光焦度的前组和具有正光焦度的后组,初始结构的反远比为2.5:1,本文设计的最终结构的反远比应达到6:1。因此,后工作距还需要做出较大的调整,可通过拉大两组之间的距离,使像方主面后移来增加后工作距。

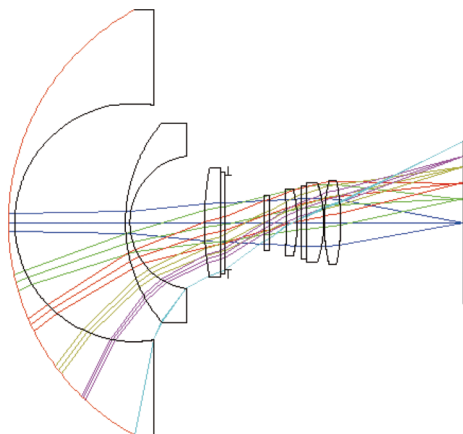


图7 初始光学结构

Fig. 7 Diagram of initial optical structure

对具有极大视场角的鱼镜头,常规像差中边缘视场最大孔径处的弧矢彗差一般不作为优化指标进行控制。此外,还需要控制以下7种高级像差^[12]:

- 1) 轴上点边缘口径的高级球差;
- 2) 边缘视场最大孔径的子午视场高级球差;
- 3) 边缘视场口径高级子午彗差;
- 4) 边缘视场的视场高级子午彗差;
- 5) 高级细光束子午场曲;
- 6) 高级细光束弧矢场曲;
- 7) 色球差。

将焦距、后工作距等结构参数调整到目标值后,开始进行优化设计。这一过程主要是将上述像差控制在合理的范围内,并将工艺性纳入考虑。前面提到第一片透镜的面形已经为光学加工造成了极大的难度,且入射光线在此面产生了相当大的偏角,引入了大量像差,特别是彗差、畸变。为减小偏角,将首片透镜材料替换为高折射率玻璃 H-LAF1。将第二片透镜改为双凹形负透镜,起到进一步分担负光焦度的作用。将前组复杂化,为增加像差校正的自由度,加入了一个弯月形负透镜,再将后面的双胶合透镜改造为双分离透镜,增加了一个曲面和一个间隔的变量,这样更有利于校正像散和场曲。后组仅保留了一对双胶合透镜和一个凸透镜,采用高折射率玻璃材料 H-ZF52A 和低色散玻璃材料 H-FK61,使后组结构在

去掉一个镜片的情况下,还能够对前组的剩余像差进行充分校正。

3.3 设计结果及评定

优化后的最终光学结构如图8所示。由图8可以看出。系统由8片透镜组成,镜片最大口径控制在78 mm以内,每片透镜的形状均易于加工,具有较好的工艺性。系统各视场像元尺寸均小于芯片单像素尺寸($2.71\ \mu\text{m}$),如图9所示。系统横向色差如图10所示,可看出横向色差小于1/2像素尺寸。场曲和相对畸变如图11所示,该畸变是由前述公式计算得到的相对畸变,控制在13.2%以内。相对照度如图12所示,可看出相对照度达到68%。光学传递函数如图13所示。从图13可看出,全视场MTF值在奈奎斯特频率185 lp/mm处均达到0.4以上,为加工及装配过程中产生的误差预留了足够的空间。

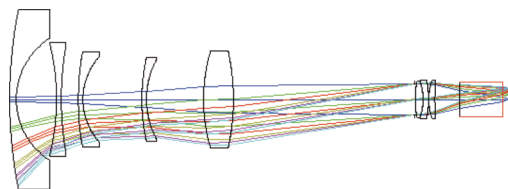


图8 最终光学结构

Fig. 8 Diagram of final optical structure

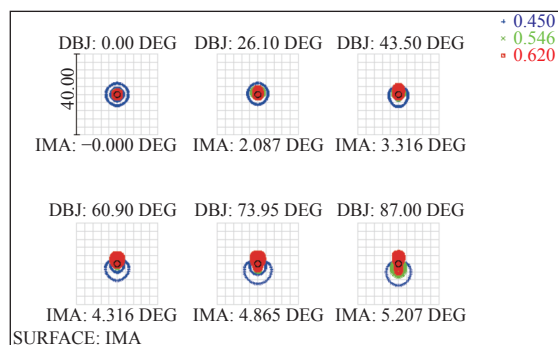


图9 点列图

Fig. 9 Spot diagram

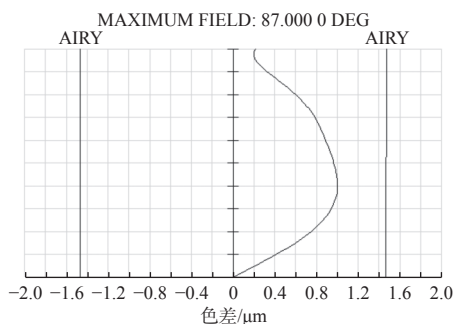


图10 横向色差

Fig. 10 Curves of lateral chromatic aberration

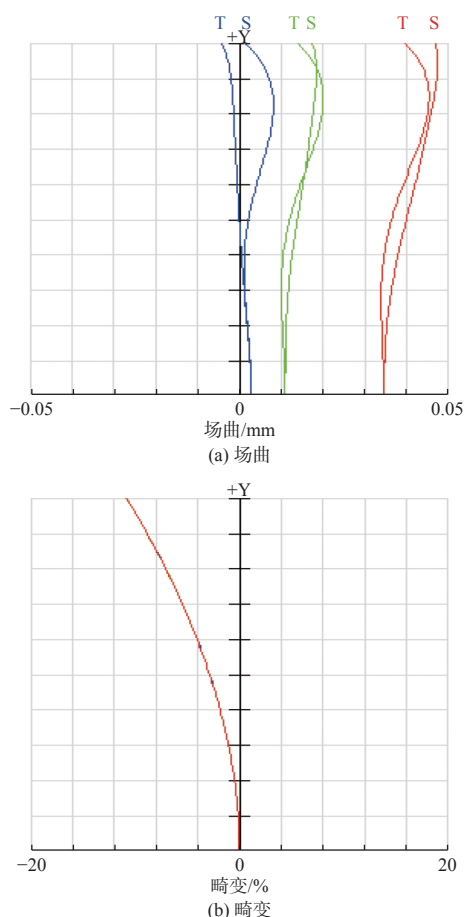


图 11 场曲和畸变

Fig. 11 Curves of curvature and distortion

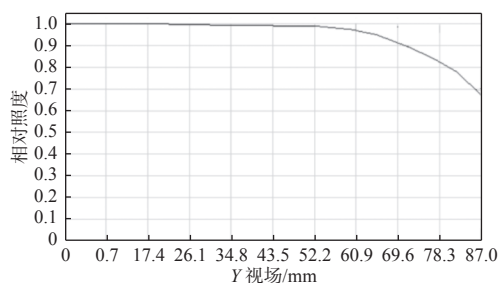


图 12 相对照度

Fig. 12 Curves of relative illumination

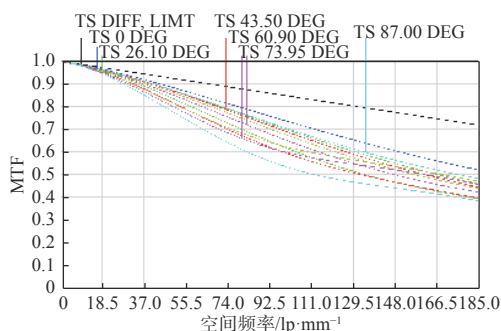


图 13 光学传递函数

Fig. 13 Curves of MTF

4 结论

为满足高效率、低成本与较强沉浸感的中小型飞行模拟器的使用需求, 本文给出了模拟器球带幕投影系统的设计方案, 并基于该方案设计了一款鱼眼投影镜头。根据实际需求, 确定了球带幕的尺寸, 给出了通过关键参数选取投影机的方法。基于投影机的参数以及方案指标要求, 设计了一款具有 174°视场角和 6:1 反远比的投影镜头, 实现了单台机器置于银幕上沿就可以投满整个球带幕的投影方案。文中针对鱼眼镜头的特殊性, 对其照度均匀性、畸变及场曲进行了深入分析和讨论。该镜头仅由 8 片透镜构成, 满足 4 k 分辨率的高质量投影要求, 且具有较好的工艺性。

参考文献:

- [1] 肖永生. 飞行模拟器视景显示系统的设计[J]. 科技广场, 2009(11): 103-106.
XIAO Yongsheng. Research and design of the flight simulator visual display system [J]. Science Square. 2009(11): 103-106.
- [2] 石小林. 一种基于数字视频图像的飞行模拟器视景系统研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2020.
SHI Xiaolin. Research on a visual system of flight simulator based on digital video image[D]. Beijing: Beihang University,
- [3] 雷励星, 陈晓明. 某型直升机模拟器视景系统[C]//2000系统仿真技术及其应用学术交流会议论文集. 北京: 中国自动化学会, 2000: 316-320.
LEI Lixing, CHEN Xiaoming. Helicopter flight simulator visual system [C]// Proceedings of 2000 Academic conference of system simulator technology and application. Beijing: Chinese Association of Automation, 2000: 316-320.
- [4] 郭云松. 飞行模拟器球幕视景显示系统的设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(8): 208-215.
GUO Yunsong. Dome-type visual display system research and realization for flight simulator[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(8): 208-215.
- [5] 邓晴莺, 刘国翠, 王宝奇, 等. 某飞行模拟器视景系统的设计与实现[J]. 兵工自动化, 2016, 35(8): 75-79.
DENG Qingying, LIU Guohui, WANG Baoqi, et al. Design and implementation of certain type flight simulator visual system[J]. Ordnance Industry Automation, 2016, 35(8): 75-79.

- [6] 邓晴莺, 刘国翠, 王宝奇, 等. 大下视场飞行模拟器视景系统的设计与实现[J]. 系统仿真技术, 2016, 12(2): 123-139.
- DENG Qingying, LIU Guohui, WANG Baoqi, et al. Design and implementation of a large down FOV visual system in a flight simulator[J]. System Simulation Technology, 2016, 12(2): 123-139.
- [7] 孙鑫. 飞行模拟用小形球幕投影系统的研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 2006.
- SUN Xin. Study on the miniaturize dome-screen projector system for the flight simulator[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [8] 孙鑫, 白加光, 王忠厚. 球幕投影光学系统的设计与研究[J]. 光子学报, 2006, 35(11): 1766-1769.
- SUN Xin, BAI Jiaguang, WANG Zhonghou. Design and study of the dome-screen projector optical system[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(11): 1766-1769.
- [9] 陈琛, 王宝琦, 李臣友. 鱼眼镜头在数字电影和数字投影中的应用[J]. 现代电影技术, 2008(1): 29-32.
- CHEN Chen, WANG Baoqi, LI Chenyou. Application of fish-eye lens in digital movies projection[J]. Advanced Motion Picture Technology, 2008(1): 29-32.
- [10] 李维善, 陈琛, 刘宵婵, 等. 球幕投影数字鱼眼镜头的光学设计[J]. 应用光学, 2016, 37(1): 39-44.
- LI Weishan, CHEN Chen, LIU Xiaochan, et al. Optical design of digital fish-eye lens for dome-screen projector[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(1): 39-44.
- [11] 张曾宝. 投影显示系统光学引擎研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2004.
- ZHANG Zengbao. Optical engine of projection display system[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2004.
- [12] 王永仲. 鱼眼镜头光学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- WANG Yongzhong. Fisheye lens optics[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [13] 陈琛, 胡春海, 李维善, 等. 物镜像面相对照度计算方法[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1108001-1-13.
- CHEN Chen, HU Chunhai, LI Weishan, et al. Calculation method of relative illumination of lens image plane[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1108001-1-13.
- [14] 张以谟. 应用光学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- ZHANG Yimo. Applied optics[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- [15] 刘畅, 向阳, 刘波, 等. 红外反远距光学系统的小型化设计[J]. 应用光学, 2011, 32(3): 426-429.
- LIU Chang, XIANG Yang, LIU Bo, et al. Miniaturization design of infrared inverted telephoto optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(3): 426-429.
- [16] 刘宵婵, 陈琛, 宋涛, 等. 4 K数字放映机广角放映镜头的设计[J]. 应用光学, 2014, 35(3): 400-403.
- LIU Xiaochan, CHEN Chen, SONG Tao, et al. Design Of wide-angle projection lens for 4K digital projector[J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(3): 400-403.