飞行训练模拟器广角无限显示系统设计

关英姿

(哈尔滨工业大学 航天学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 飞行训练模拟器广角无限显示系统是飞行训练模拟器的重要组成部分,其设计质量直接影响到飞行模拟器的性能. 而广角无限显示系统中准直镜和背投屏的面形是决定广角无限显示系统成像质量的关键因素,因此,准直镜和背投屏的设计成为研制广角无限显示系统的关键. 针对设计适用于双座飞机飞行模拟的广角无限显示系统的技术要求,讨论了零视场消像散条件,选取可保证零视场像散为零的镯形面作为准直反射镜的面形,确定了准直镜的尺寸;以弥散斑最小为原则,通过反向光线追迹得到了背投屏的面形和位置,最后进行了准直精度计算. 设计的广角无限显示系统可达到水平视场 180°,垂直视场 45°,已用于飞行训练.

关 键 词: 飞行训练模拟器; 广角无限显示系统; 准直镜; 背投屏; 消像散

中图分类号: V 216.7; O 439

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)10-1214-03

Design of wide-angle infinity display equipment of airplane simulator

Guan Yingzi

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Wide-angle infinity display equipment (WIDE) is an important part of airplane simulator which directly affects the performance of airplane simulator. Surface shape of collimating mirror and back-projection screen in WIDE is a key factor which decides imaging quality. Therefore, the design of collimating mirror and back-projection screen turns into a key problem in WIDE development. Aiming at the technical requirement of WIDE of airplane simulator for two-seater airplanes, the condition of compensating astigmation of zero field of view was discussed, the surface of collimating mirror was designed to be bracelet form to ensure the astigmation of zero field of view would be zero, and determine the size of collimating mirror. On the principle for minimum disc of confusion, shape and location of back-projection screen was obtained by inverse ray tracing, finally the collimation precision calculated. The WIDE designed could provide 180 horizontal field angle and 45 vertical field angle, and is already used in flight training.

Key words: airplane simulator; wide-angle infinity display equipment (WIDE); collimating mirror; back-projection screen; astigmation

广角无限显示系统 WIDE (Wide-angle Infinity Display Equipment)又称旁轴虚像显示系统,是飞行训练模拟器主要采用的视景显示系统,作用是为飞行员提供图像[1]. WIDE系统主要由投影机、准直镜和背投屏组成,投影机将图像投影到背投屏上,在背投屏上生成可视景像. 背投屏位于准直镜的焦面上,背投屏上每一像点发出的有效光,经准直镜反射后变为平行光射入视点区域,于是,在视点区域内,人眼通过准直反射镜对背投屏进行观察时,会看到相当于无限远的正立图像. 可见,准直镜和背投屏是 WIDE系统的主要组成部分,其设计质量的好坏直接影响到 WIDE的成像质量,以至于影响飞行训练模拟器的性能,因此,有必要对准直镜和背投屏的设计进行深入的研究. 文献[2]利用球面准直镜成像理论,推导了 WIDE系统中后投射屏位置的计算公式;文献[3]

收稿日期: 2007-10-22

作者简介: 关英姿 (1968-),女,黑龙江哈尔滨人,教授, guanyz@hit.edu.cn.

讨论了利用光线追迹确定背投屏的方法,但他们均是针对球面准直镜进行的背投屏设计,并且均未研究球面像散对视景系统成像的影响.

本文详细研究了 WDE系统准直镜和背投屏的设计方法,以零视场消像散作为准直镜面形选择的原则,以弥散斑最小作为确定背投屏面形的原则,进行了准直镜和背投屏的设计,并计算了 WDE系统的准直精度.

1　设计要求及设计思想

广角无限显示系统的设计要求:①垂直视场角 45°(+20°-25°);②水平视场角 180°;③双座间距 945mm;④准直精度:在出射光瞳内,显示发射小于等于 -0.1屈光度或显示收敛时小于等于 +0.02屈光度;⑤座舱内空间都处于光学系统出瞳以内,在座舱内均能按正常视野观察到视景.

该系统的特点是光学系统的物和产生的像偏离光轴很远,光学系统不满足近轴光学公式和规律,因而需进行合理的光路设计,通过合理地选择反光镜的面形、背投屏的面形以及背投屏相对于反光镜的位置,以保证成像距离远、图像失真小、视场满足要求.

整个设计过程如下:首先根据设计要求,并参考相关资料,选定反射镜的面型、尺寸以及视点的位置,反射镜面型的选择主要以消除零视场像散为依据,然后利用 zemax光学设计软件进行空间光路追迹,以最小弥散斑为优化准则,追迹出背投屏的型面.然后进行像差和成像距离的计算,在背投屏型面上取若干个物点,从每一个物点出发计算若干条光线,考察成像质量和成像距离,若不满足要求,则反复修改背投影屏的位置和面型以及视点的位置,直到满足设计要求.

2　准直镜设计

准直镜设计包括选择准直镜面形和确定准直镜尺寸两部分.为保证成像清晰,无眩晕感,准直镜面形选择以零视场消像散为原则,准直镜尺寸确定主要考虑满足水平视场和垂直视场要求.

2.1　零视场消像散条件

轴外物点细光束弧矢焦点位置和子午焦点位置可由式 (1)和式 (2)计算[4]:

$$n'/s' - n/s = (n'\cos I' - n\cos I)/r_s \quad (1)$$

$$\frac{n'\cos^2 I'}{t'} - \frac{n\cos^2 I}{t} = \frac{(n'\cos I' - n\cos I)}{r_t} \quad (2)$$

式中,s和 s分别为折射点至弧矢像点和弧矢物点之间的距离;t和 t分别为折射点至子午像点和子午物点之间的距离;I和 I为折射角和入射角;r_t和 r_s为过光轴的子午面和弧矢面的曲率半径;n和 n为入射介质和反射介质的折射率.

球面的子午半径和弧矢半径相等,即,$r_t = r_s$.由式 (1)和式 (2)知,对于球面折射面或反射面来说,子午焦点位置 t和弧矢焦点位置 s不相等,存在像散.可见,要想像散为零,需要子午半径和弧矢半径不相等,下面推导为保证反射准直镜零视场像散为零,子午半径和弧矢半径应满足的关系.

对于反射面,有:$n' = n = 1$, $I' = -I = \theta$, $s = t$,为使 $s' = t'$,由式 (1)和式 (2)可得

$$r_s = r_t\cos^2\theta \quad (3)$$

式中 θ为入射轴与光轴间的夹角.

由式 (3)可知,只有采用双曲率反射面,且 2个曲率半径的取值满足式 (3),才能保证物点经过反射面后无像散.由数学知识可知,这样的面为镯面.为此,准直镜面型设计以零视场无像散为设计原则,选择镯形面为面型.表 1给出了反射面为球面和镯形面时各视场的像散值.

表 1　各视场的像散

视场/(°)		像散/mm	
水平	垂直	球面	镯形面
0	0	-270.03	0
0	±5	-268.72	0.164
0	±10	-264.84	0.642
0	±20	-249.79	2.424
0	-25	-239.10	3.624
±20	0	-249.79	2.424
±30	0	-222.68	4.943
±45	0	-183.0	8.817
±60	0	-138.91	11.079
±80	0	-97.85	11.064
±45	±10	-179.49	9.272
±45	±20	-159.95	10.254
±60	+20	-114.92	11.298
±45	-25	-149.91	10.713
±60	-25	-110.59	11.204
±80	-25	-78.812	18.845

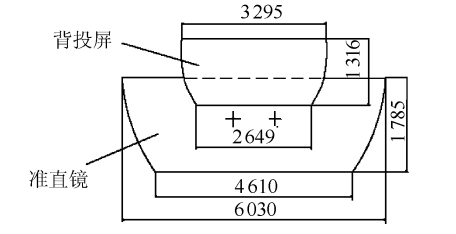
2.2　视点位置和准直镜尺寸确定

在选定准直镜的面型后,准直镜尺寸大小取决于视点相对于准直镜的位置和视场角的大小.选取双视点相对于准直镜的位置应考虑在保证要求的视场角的前提下,准直镜的尺寸不能太大,一般最大直径在 3～3.5m,同时应保证背投屏上所有物点的光线均能进入视点.通过多次反复的光线追迹,确定了视点位置和准直镜尺寸,即镯形准直镜子午面半径 r_t = 3500mm,球心在视点上方 1200mm处,弧矢面半径 r_s = 3000mm,准直镜宽度为 6030mm,高度 1785mm.

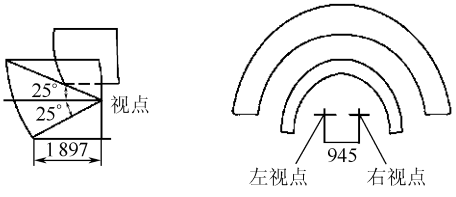
3 背投屏设计及准直精度计算

3.1 背投屏设计

背投屏型面是利用 zemax光学设计软件通过反向光线追迹得到的,来自视点的不同角度的平行光经过准直镜后聚焦,以最小弥散斑为优化原则,确定这些聚焦点,聚焦点形成的曲面就是背投屏型面.图 1给出了设计好的准直镜和背投屏的尺寸及相对位置,图中单位为 mm.



a 主视图



b 侧视图 c 俯视图

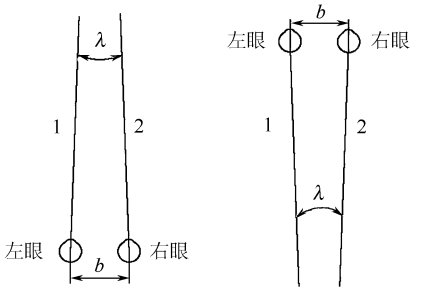
图 1 准直镜和背投屏设计结果

3.2 准直精度计算

背投屏上每一像点发出的有效光,经准直镜反射后射入视点 (人眼)区域,此时存在 2种情况: ①射入光线在视点前方相交,此种情况称显示发散,如图 2a所示; ②射入光线在人眼后方相交,此种情况称为显示收敛,如图 2b所示.理想情况下,背投屏上每一像点发出的光,经准直镜准直后平行地射入视点,即成像于无穷远.对于实际准直系统,用实际成像距离的倒数表示准直精度.图 2中光线 1和光线 2的夹角 λ可由式 (4)计算:

$$\cos\lambda = \frac{x_1 \cdot x_2 + y_1 \cdot y_2 + z_1 \cdot z_2}{\sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2} \cdot \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}} \quad (4)$$

式中, x_1, y_1, z_1和 x_2, y_2, z_2分别为光线 1和光线 2的方向余弦.



a 显示发散 b 显示收敛

图 2 显示发散和显示收敛示意图

设背投屏上的一个图像点经准直镜后所成的像点到视点的距离为 l,左右眼的瞳孔距为 b,则

$$l = b/\lambda \quad (5)$$

式中,λ为光线的夹角, rad 当 l的单位为 m时, l的倒数即为屈光度.

利用 zemax软件进行光线追迹,可得到光线 1和光线 2的方向余弦值,于是由式 (4)和式 (5)可求出显示屈光度.经计算,设计的视景系统在出射光瞳内显示发散均小于 -0.1屈光度,显示收敛均小于 0.02屈光度,满足设计要求.

4 结 论

本文实现了广角无限显示系统准直镜和背投屏的设计,得到以下结论: ①镯形面准直反射镜可保证零视场消像散,与球面准直反射镜相比,其各视场具有更小的像散值. ②为保证背投屏处于镯形面准直鏡的焦面上,可利用 zemax软件通过反向光线追迹来确定背投屏的面形和位置. ③通过准直精度计算,得到设计的广角无限显示系统的准直精度为:在出射光瞳内,显示发散小于等于 -0.1屈光度或显示收敛时小于等于 +0.02屈光度,满足设计要求.本文所设计的广角无限显示系统各项指标满足要求,已用于飞行训练.

参考文献 (References)

[1] 李明忠,毕长剑,丁大勇.飞行训练仿真器视景显示系统及其方案研究 [J].系统仿真学报, 2005, 17(7): 1637 - 1640
Li Mingzhong, Bi Changjian, Di Dayong. Research on visual display system of flight training simulator and selecting its design scheme[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(7): 1637 - 1640 (in Chinese)

[2] 卢颖,范贤德,王勇亮.广角无限视景显示系统后投射屏的设计与研究 [J].光学技术, 2003, 29(2): 158 - 160
Lu Ying, Fan Xiande, Wang Yongliang. Design and study of back project screen about wide-angle infinity visual scene display system[J]. Optical Technique, 2003, 29(2): 158 - 160 (in Chinese)

[3] 马起跃,西光旭.飞行模拟器视景光学虚像显示广角无限显示系统的技术及应用 [J].系统仿真学报, 2002, 14(3): 319 - 321
Ma Qiyue, Xi Guangxu. Technologies and applications of wide-angle infinity display equipment system for collimated-image displays of flight simulation [J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(3): 319 - 321 (in Chinese)

[4] 袁旭沧.光学设计 [M].北京:北京理工大学出版社, 1988
Yuan Xucang. Optical design[M]. Bejing: Bejing Institute of Technology Press, 1988 (in Chinese)

(责任编辑:张 嵘)