

文章编号: 0253-2239(2010)09-2662-06

离轴双通道头盔显示器光学系统设计

佟静波 崔庆丰 薛常喜 潘春艳 张 栋 张康伟

(长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要 论述了双通道头盔显示器光学系统的结构特点。根据对双通道头盔显示器应用要求的讨论,确定了它的技术指标。分析了离轴像差的特性,并在光学系统合适的位置处使用合理的自由曲面面型,有效地校正了离轴像差。设计的离轴双通道头盔显示器光学系统的技术指标为视场 $40^\circ \times 30^\circ$, 出瞳直径 15 mm, 焦距 26.4 mm, 眼点距 25 mm, 波长 540~560 nm, 后截距大于 3 mm, 眼分辨率满足在 0.88 lp/mrad 空间频率处的调制传递函数(MTF)值大于 0.1。该系统的结构紧凑(系统尺寸 70 mm \times 122 mm), 重心位置适当, 可以内嵌入头盔侧面使用。

关键词 光学设计; 头盔显示器; 自由曲面; 离轴像差分析

中图分类号 TH74 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103009.2662

Optical Design of A Off-Axis Dual-Channel Helmet Mounted Display

Tong Jingbo Cui Qingfeng Xue Changxi Pan Chunyan Zhang Dong Zhang Kangwei

(Department of Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract Structure characters of a dual-channel helmet mounted display (DCHMD) optical system was analyzed. Based on the discussion of the requirements of DCHMD in application, the system's technical specifications were presented. The off-axis aberration was analyzed and corrected by proper freeform surface at the right place of the optical system. A DCHMD optical system was developed with technical specifications: $40^\circ \times 30^\circ$ field of view, 15mm exit pupil diameter, 26.4 mm effective focal length, 25 mm eye relief distance, wavelength range 540~560nm, back focal length more than 3 mm and modulation transfer function (MTF) higher than 0.1 at the frequency of 0.88 lp/mrad. This system has a compact size (70 mm \times 122 mm) and a decent center of gravity, and could be embedded in the helmets.

Key words optical design; helmet mounted display (HMD); freeform surface; off-axis aberration analysis

1 引 言

双通道头盔显示器在医学、工业、娱乐、军事等领域已经开始扮演重要的角色。对于双通道头盔显示器, 紧凑的结构、较轻的重量、良好的携带舒适度和高性能的光学系统都是必不可少的要求, 这些因素造成其光学系统的设计是一项非常具有挑战性的工作。双通道头盔显示器的光学系统从结构上大体可分为共轴系统和离轴系统两种类型。

共轴系统设计简单、加工工艺性好, 但是光学透

射率低、容易产生鬼像、体积大、重量重。

离轴系统光学透过率高, 可以消除鬼像, 比较容易满足体积和重量方面的要求, 但是光学系统设计难度和加工难度大。

目前关于离轴双通道头盔显示器系统的文献中, 光学系统概述性的文章较多, 对光学系统设计进行具体分析和讨论的文章很少。2005年 J. P. Rolland 等对头盔显示器光学系统进行了介绍, 但没有对成像质量、光学结构和像差等内容进行讨

收稿日期: 2009-11-05; 收到修改稿日期: 2009-12-01

作者简介: 佟静波(1982—), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事光学系统设计和结构设计等方面的研究。

E-mail: tjbel@sohu.com

导师简介: 崔庆丰(1954—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事衍射光学及光学设计等方面的研究。

E-mail: cuiqf@yahoo.com.cn(通信联系人)

论^[1]。2002 年 Kaiser Electronics 公司对一种应用在军用直升飞机上的头盔显示器光学系统进行了相关介绍,但是没有光学结构图以及像差特性和校正方法的分析^[2]。2000 年 J. P. Rolland^[3]和 2006 年曹培联等^[4]都对离轴头盔显示器光学系统进行了比较详细的介绍,但文中也没有分析各种离轴像差的特性和具体的校正方法。

本文结合实际应用上的需要,通过对头盔显示器光学系统技术指标和离轴像差的讨论,以及像差校正方法的分析,采用自由曲面面型,设计了一个结构紧凑、重量轻,可以内嵌在头盔侧面使用的双通道头盔显示器光学系统。并且此系统的重心位置适当,满足携带舒适、头部转动灵活等要求。

2 光学系统的结构

2.1 设计要求

光学系统设计要考虑各指标的合理性,不仅要满足特定的光学性能要求,还要保证使用者在使用过程中舒适。

1) 出瞳直径和眼点距

为了防止因为头盔移动而导致眼睛接收不到图像,头盔显示器的入瞳直径要远大于 3 mm,取 15 mm。考虑到有些情况使用者会佩戴眼镜等物品,眼点距(眼睛到合成镜的最近距离)要大于 25 mm。

2) 视场角、眼分辨率和焦距

视场的大小是根据图像源所显示的图像内容所决定的,不同的显示内容所需要的视场角也各不相同。如果要求显示视频图像,圆视场至少需要 40° ^[5],有关文献^[2,6]指出, $40^\circ(\text{H}) \times 30^\circ(\text{V})$ 的视场角,可以更好的满足显示视频图像的要求。根据以上讨论选取视场为 $40^\circ(\text{H}) \times 30^\circ(\text{V})$,以达到观看视频图像的目的。

在设计过程中,为了评价方便,系统眼分辨率要换算成液晶显示器的分辨率。对于液晶显示器的分辨率,首先要根据视场和眼分辨率确定液晶显示器的像素数量。根据计算,当眼分辨率取 $2'$ 时, 40° 和 30° 视场角所对应的像素数分别为 1280 和 943。这说明对于本系统如果要保证系统眼分辨率是 $2'$,则至少需要选取像素为 $1280 \text{ pixel} \times 943 \text{ pixel}$ 的液晶显示器。

根据讨论,选取了已经应用在 RAH-66 科曼奇直升机头盔显示器中的有源矩阵液晶显示器(AMLCD)^[7]。其技术特性如表 1 所示。

表 1 科曼奇 AMLCD 说明

Table 1 Comanche AMLCD specifications

Characteristic	Specification
Display format	1280×1024 (monochrome)
Pixel pitch / μm	15
Active area /inch ²	0.760×0.610 (0.96 inch diagonal)
Overall dimensions /mm ²	24.1×18.4
Viewing angle /($^\circ$)	40

以奈奎斯特频率 33.31 lp/mm 为特征频率,并且考虑人眼观察运动图像时调制传递函数(MTF)要大于 0.1,所以要求 33.31 lp/mm 空间频率处的 MTF 值大于 0.1(对应眼分辨率 0.88 lp/mrad 空间频率处的 MTF 值大于 0.1)。

从表 1 中可以看出 AMLCD 的视角(像元的发光圆锥角)是 40° ,为保证系统远心光路的光锥角不超过 40° ,需要系统 F 数大于 1.37(即焦距大于 20.6 mm)。系统有效焦距根据计算是 26.4 mm,符合要求。

3) 波长与后截距

系统波长选取人眼最敏感的 540~560 nm 波段。考虑到 AMLCD 的安装,后截距要求大于 3 mm。

2.2 设计原理与光学结构

系统工作原理如图 1 所示:双通道头盔显示器光学系统的作用是使外界景物发出的光透过合成镜 2 进入人眼的同时,AMLCD 发出的光也同时经过中继光学系统 I 和合成镜后成为平行光入射到人眼位置 1 处,这样当人眼看外界无穷远物体的同时,也可以清晰地看到图像源产生的图像信息。

文中对光学系统设计原理的光路分析和像质评价分析都将采用和工作原理光路相反的方式,其中设计原理的光路分析如下:人眼位置 1 处发出的光线经过合成镜 2 反射后进入透镜 3,透镜 3 是一个正场镜,用来压缩光束的口径,控制系统尺寸。透镜组 II 和自由曲面 1 是准直透镜组,使光束以合适的角度(接近平行)入射到自由曲面 2 上,以便平均各视场像差和有效控制自由曲面 2 来实现像方远心光路。像面(AMLCD 处)有一个倾斜角度,使 AMLCD 的电路板可以放在图中 4 所示位置,减小了系统体积,使光学系统可以内嵌入头盔侧面,而不增加侧面的尺寸。系统重心在后方,不会在佩戴后产生前坠感。

合成镜面型是轮胎面;自由曲面 1 是 xy 多项式;自由曲面 2 是基于轮胎面的 xy 多项式;其余各面都是标准球面。正透镜采用冕牌玻璃,棱镜采用

火石玻璃。

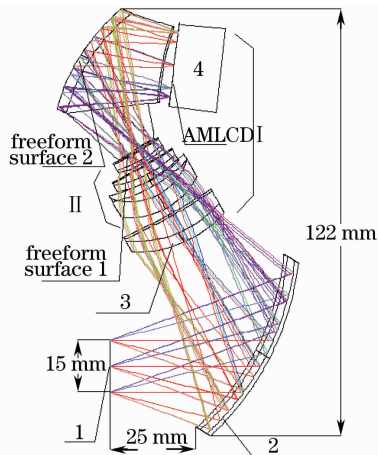


图 1 光学系统三维布局

Fig. 1 Optical system 3D layout

3 像差特性与校正方法

对于离轴非对称系统,因为镜片的倾斜和偏心,系统在各个面产生的像差具有了空间性和方向性。根据 Thompson 所提出的理论^[8],具有倾斜和偏心的离轴系统的像差分析应将波前像差展开成矢量形式,运用矢量像差理论进行分析。

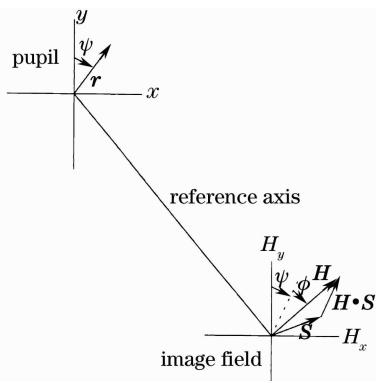


图 2 入瞳和视场矢量

Fig. 2 Entrance pupil and field vectors

根据三级波前像差的极坐标赛德尔多项式和图 2 坐标系并且考虑倾斜和偏心元件对像差的影响,可得倾斜或偏心光学系统在第 i 个面上产生的三级波前像差赛德尔多项式的矢量表达式如下^[8~10]

$$W_i = W_{040i}(\mathbf{r} \cdot \mathbf{r})^2 + W_{131i}[(\mathbf{H} - \mathbf{s}_i) \cdot \mathbf{r}](\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}) + W_{222i}[(\mathbf{H} - \mathbf{s}_i) \cdot \mathbf{r}]^2 + W_{220i}[(\mathbf{H} - \mathbf{s}_i) \cdot (\mathbf{H} - \mathbf{s}_i)](\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}) + W_{311i}[(\mathbf{H} - \mathbf{s}_i) \cdot (\mathbf{H} - \mathbf{s}_i)][(\mathbf{H} - \mathbf{s}_i) \cdot \mathbf{r}]. \quad (1)$$

式中 \mathbf{H} 和 \mathbf{r} 是没有倾斜偏心时系统归一化的场点和入瞳处孔径点的向量形式; \mathbf{s}_i 是像差场 W_i

中心相对于共轴旋转对称系统像差场中心的偏离。

则可得整个系统波前像差表达式为

$$W = \sum W_i. \quad (2)$$

T. S. Turner^[9],杨新军等^[10]根据以上理论进一步研究了离轴像差,得出以下结论:元件的倾斜和偏心对球差没有影响;当共轴光学系统初级慧差被校正时,由光学元件倾斜或偏心形成的慧差在整个像面上大小和方向恒定不变;当共轴光学系统初级像散被校正时,由光学元件倾斜或偏心形成的像散与场点高度成线性关系,并有两个零点位置;当共轴系统平均场曲被校正时,由元件倾斜或偏心形成的平均场曲焦面为平面,并且该平面可能会偏离或倾斜于高斯像面。

对于离轴光学系统,主要像差是慧差、像散和畸变,它们是需要特别考虑校正的像差。在系统中,由于合成镜倾斜而产生的离轴像差需要通过合理的中继光学系统结构来校正。

在分析离轴像差特性与校正方法之前,先讨论系统中的自由曲面面型方程,其中基于轮胎面的 xy 多项式方程表达式为^[11]

$$z = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2y^2}} + \sum_{ij} A_{ij}x^i y^j, \quad (3)$$

式中 c 为曲率; k 为圆锥常数; A_{ij} 是方程 xy 多项式系数; x, y, z 分别是光学面局部坐标系的坐标; $i, j \in Z, Z$ 为整数。

当方程只有第一项时是轮胎面方程;当只有第二项时是 xy 多项式方程。系统因为弧矢方向面型对称,所以 x 项只取偶次幂。 x, y, xy 这些项系数会直接影响曲面倾斜度和偏心量^[12],对设计中控制曲面倾斜角度不利,所以这些项的系数为零。在设计过程中可以根据改变各项的系数,控制局部面型来达到校正像差的目的。

含有两个自由曲面的反射棱镜是系统重要的光学元素。此棱镜可以认为是由两个平凹负透镜和一个入射面和出射面都为平面的反射棱镜胶合而成,第一个折射面和反射面都是自由曲面,如图 3 所示。其中自由曲面 1 在中继系统孔径光阑附近,并且是一个产生负光焦度的凹面,这样的位置和形状能让它很好地校正系统中的球差和离轴慧差。自由曲面 2 是基于轮胎面的 xy 多项式,它和合成镜一样都具有校正一部分因为自身倾斜而产生的像散的能力,并且和合成镜配合还有平衡各视场像差的作用。该反射面同时还可以使光线向特定方向反射,使系统

体积减小。平凹透镜 2 的主要作用是作为负场镜补偿系统的场曲。

中继光学系统中棱镜使用火石类玻璃,正透镜使用冕牌玻璃,所以棱镜中两个平凹负透镜和前面 4 片正透镜组合可以校正色差。另外透镜的偏心会产生色散,设计过程中可以通过控制各透镜之间的偏心方向进行补偿。

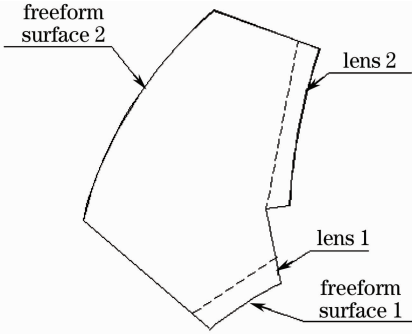


图 3 棱镜的分解图

Fig. 3 Decomposition drawing of the prism

这里还要特别说明的是:

1)对于慧差,因为系统合成镜倾斜角度大、系统入瞳距长,导致慧差零点偏离中心视场很远,慧差在子午方向上已经不具有正负对称性。需要靠自由曲面 1 和各正透镜的偏心共同校正。

2)在系统中,因为合成镜与系统孔径光阑的距离和自由曲面 2 与中继系统孔径光阑的距离以及它们自身的倾斜角度都较大,所以这两个反射面所产生的场曲不仅偏离高斯像面,而且弯曲方向也和共轴系统完全相反。在设计过程中控制系统中折射透镜的偏心,使所有正透镜和等效负透镜产生的场曲与共轴系统具有相同的弯曲方向。这样就可以达到通过场曲互补的方式校正场曲。

3)像散的校正除了通过两个反射面自身的轮胎面之外,还需要透镜偏心的补偿。轮胎面曲率半径初始值的确定是根据科丁顿(Coddington)方程^[3],分别求出子午和弧矢两个方向的曲率半径,使两个方向各自像面上的子午场曲和弧矢场曲相等。Coddington 方程如下:

$$\text{子午方向: } \frac{1}{T'} + \frac{1}{T} = \frac{2}{R_y \cos i}, \quad (4)$$

$$\text{弧矢方向: } \frac{1}{S'} + \frac{1}{S} = \frac{2 \cos i}{R_x}, \quad (5)$$

式中 T, S 和 T', S' 分别是物方和像方的子午方向和弧矢方向实际焦平面到系统零点的距离。 i 是反射镜相对于光轴的倾斜角度。为了简化计算设物体在无穷远,则 $1/T$ 和 $1/S$ 都为零。如果使方程中 T' 和

S' 相等,可得:

$$R_x = R_y (\cos i)^2. \quad (6)$$

合成镜和自由曲面 2 最终曲率半径都要根据实际的光线追迹结果来确定,(6)式只能算出系统初始结构数据。

4)自由曲面 1 和 2 都具有校正系统畸变的能力,系统最后畸变为 10.89%,如图 4 所示。

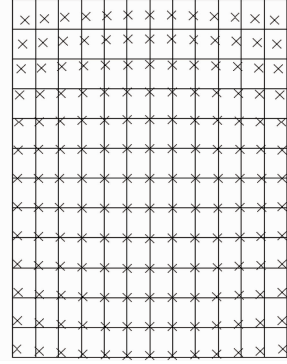


图 4 网格畸变

Fig. 4 Grid distortion

因为离轴双通道头盔显示器光学系统的结构型式,决定了此类系统会产生很大的畸变,但是因为畸变只改变像的形状而不影响像的清晰程度,所以为了减小光学系统的重量,设计此类系统时对畸变一般不做单独的光学校正,如果最后畸变不满足使用要求,通过计算机补偿的方式来校正畸变^[3,13]。

4 像质评价

考虑到系统实际使用时,人眼瞳孔直径基本在 3 mm 以内,并且因为头盔的移动会导致眼瞳中心和系统入瞳中心产生偏离,所以在进行像质评价时 33.3 lp/mm 空间频率处的 MTF 值大于 0.1 这一指标不是在入瞳直径为 15 mm 的条件下满足,而是要在以直径 15 mm 这个圆内部任意位置上的 3 mm 直径圆作为入瞳尺寸的条件下满足。以 3 mm 直径为入瞳的新系统,入瞳中心偏离原系统入瞳中心越远,系统的像质也会越差。所以要以原系统入瞳中心为坐标零点,向 x, y 四个方向分别偏移 6 mm,用这些坐标点作为 3 mm 入瞳直径新系统的入瞳中心。如果新系统在这四个位置的 MTF 曲线满足要求,那么在其余任意位置上 MTF 都会满足要求。各种情况的 MTF 曲线如图 5~10 所示。

这里还需要说明的是,因为 3 mm 入瞳中心位置的偏移会导致系统均方差弥散斑的中心位置也随之改变,所以在设计优化过程中不能认为各视场在

15 mm 光瞳直径系统下满足 33.3 lp/mm 空间频率处 MTF 值大于 0.1,则在 3 mm 光瞳直径系统下也一定会满足要求。例如图 5 中(15°, -20°)视场子午方向的 MTF 在 33.3 lp/mm 时等于 0.45,但是在图 7 中在相同特征频率下却下降到 0.14。在设计的过程中保证同一视场经过入瞳各位置的光线所产生的像差保持平稳是一项很重要的工作。否则会

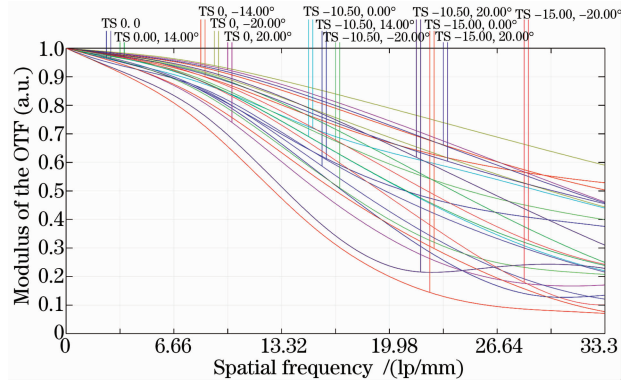


图 5 入瞳直径为 15 mm 时的 MTF 曲线
Fig. 5 MTF Curves for the 15mm entrance pupil diameter

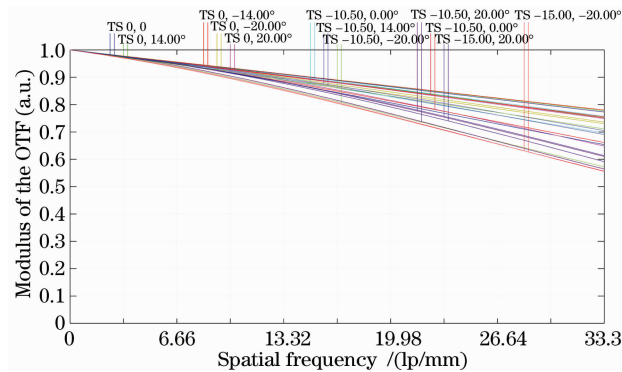


图 6 入瞳直径为 3 mm,中心坐标(0,0)时的 MTF 曲线
Fig. 6 MTF Curves for the 3 mm entrance pupil diameter at the center coordinate (0,0)

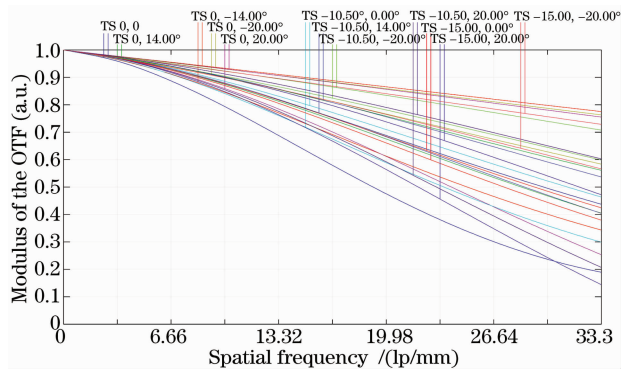


图 7 入瞳直径为 3 mm,中心坐标(0,6)时的 MTF 曲线
Fig. 7 MTF Curves for the 3 mm entrance pupil diameter at the center coordinate (0,6)

出现 15 mm 光瞳直径时所有视场的 MTF 值全部大于 0.1,但在 3 mm 光瞳直径下部分视场的 MTF 值却小于 0.1 的情况。

系统畸变为 10.89%(如图 4 所示),对于要求不高的系统可以满足要求,对于高要求系统需要计算机补偿校正。

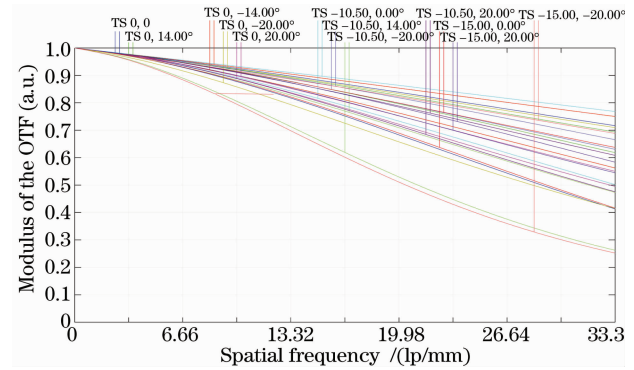


图 8 入瞳直径为 3mm,中心坐标(0,-6)时的 MTF 曲线
Fig. 8 MTF Curves for the 3 mm entrance pupil diameter at the center coordinate (0,-6)

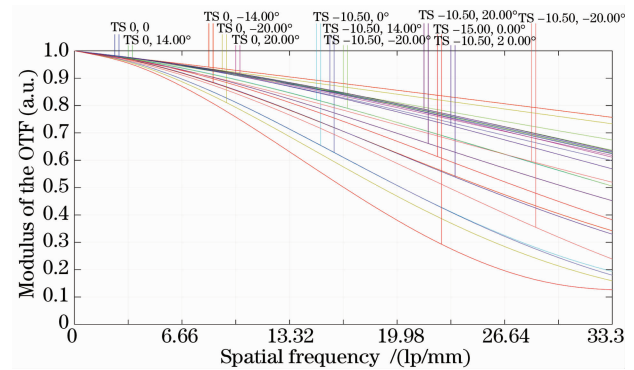


图 9 入瞳直径为 3 mm,中心坐标(6,0)时的 MTF 曲线
Fig. 9 MTF Curves for the 3 mm entrance pupil diameter at the center coordinate (6,0)

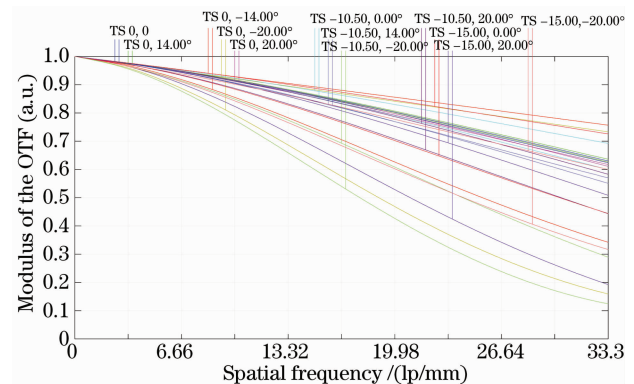


图 10 入瞳直径为 3 mm,中心坐标(-6,0)时的 MTF 曲线
Fig. 10 MTF Curves for the 3 mm entrance pupil diameter at the center coordinate (-6,0)

5 结 论

采用球面透镜和反射棱镜相结合的光学结构,使 AMLCD 可以放置在光学系统的侧面,达到了系统结构紧凑、重心位置适当、携带舒适的要求,整个系统可以内嵌入头盔侧面使用。通过对离轴像差的特性和校正方法的分析,利用自由曲面可以校正离轴像差的特点,在光学系统的合成镜、反射棱镜反射面和中继光学系统光阑附近分别使用合理的自由曲面面型,有效地校正了离轴光学系统的慧差、像散和场曲等像差。设计了一个满足使用要求的双通道头盔显示器光学系统。此系统视场较大,可以观看动态视频图像;出瞳直径较大,可以防止因为头盔移动而导致眼睛接收不到图像;眼点距较长,可以佩戴眼镜等物品。

参 考 文 献

- 1 J. P. Rolland, O. Cakmakci. The past, present, and future of head-mounted display designs[C]. *SPIE*, 2005, **5638**: 368~377
- 2 F. Raynal, M. Chen. Advanced rotorcraft helmet display sighting system optics[C]. *SPIE*, 2002, **4711**: 1~10
- 3 J. P. Rolland. Wide-angle, off-axis, see-through head-mounted Display[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(7): 1760~1767
- 4 Cao Peilian, Li Lin. The optical design of a novel helmet mounted display[C]. 2006' General Meeting of Chinese Optical Society, 2006, 35
曹培联, 李 林. 新型头盔显示器光学系统设计[C]. 中国光学学会 2006 年学术大会, 2006, 35
- 5 Y. Liu. Designing the integrated helmet mounted display for pilots[C]. *SPIE*, 1998, 3560: 175~181
- 6 C. E. Rash, K. Heinecke, G. Francis. Perceptual issues of the integrated helmet and display sighting system (IHADSS): four expert perspectives[C]. *SPIE*, 2008, **6955**: 69550D-1~14
- 7 O. C. Woodand, R. P. Gale, H. L. Ong *et al.*. Developing the 1280 by 1024 AMLCD for the RAH-66 comanche[C]. *SPIE*, 2000, 4021: 203~213
- 8 K. Thompson. Aberration Fields in Tilted and Decentered Optical Systems[D]. Arizona: University of Arizona. 1980
- 9 T. S. Turner. Vector aberration theory on a spreadsheet-analysis of tilted and decentered systems [C]. *SPIE*, 1992, **1752**: 184~195
- 10 Yang Xinjun, Wang Zhaoqi, Mu Guoguang *et al.*. Aberration properties of the decentered and tilted optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11): 1658~1662
杨新军, 王肇圻, 母国光 等. 偏心和倾斜光学系统的像差特性 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(11): 1658~1662
- 11 ZEMAX Development Corporation, Zemax Manual[M]. version: November 10, 2008
- 12 Wang Yunxia, Lu Zhenwu, Liu Hua *et al.*. Application of freeform surface prism[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(3): 219~221
王云霞, 卢振武, 刘 华 等. 自由曲面棱镜应用[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(3): 219~221
- 13 R. Hebson, L. Lee. Advanced rotorcraft helmet mounted display sighting system optical distortion correction methodology [C]. *SPIE*, 2002, **4711**: 20~27
- 14 G. Bull. Helmet displays optics-a route map[C]. *SPIE*, 1990, 1290, 81~92
- 15 T. Christopher. Flat panel displays in the helmet mounted display[C]. *SPIE*, 2002, **4711**: 33~47
- 16 K. Inoguchi, M. Matsunaga, S. Yamazaki. The development of a high-resolution HMD with a wide FOV using the shuttle optical system[C]. *SPIE*, 2008, **6955**(03): 1~8