

文章编号: 0253-2239(2004)10-1393-4

折/衍混合微光夜视头盔显示器光学系统设计*

张慧娟¹ 王肇圻¹ 卢振武²

(¹ 南开大学现代光学研究所, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300071
² 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 长春 130022)

摘要: 设计了穿透式双通道单目微光夜视头盔的光学系统。其中微光物镜视场角为 $\pm 14^\circ$, f 数为 1.4, 含有一个衍射面。设计结果可兼容输入面尺寸为 $\phi 18$ mm, 面型为平面的二代和三代微光像增强器; 最大畸变小于 0.5%, 可用于夜间精确瞄准与测量。考虑黑暗环境使用的安全问题, 显示系统采用穿透式双通道单目光学系统, 实现内部图像和外部真实世界的同时观察。显示系统的特性参量为: 出瞳尺寸为 15 mm(H) \times 10 mm(V)、视场为 $[\pm 14^\circ(H)]\times[\pm 10^\circ(V)]$ 、出瞳距离为 25 mm。采用全息组合器大大提高能量利用率。设计结果系统角分辨力为 0.6 mrad, 最大畸变为 3%。显示系统结构紧凑, 可与输出面尺寸为 $\phi 18$ mm 的图像源相连。

关键词: 应用光学; 光学设计; 折/衍混合系统; 微光夜视; 头盔显示器

中图分类号: O435.2 文献标识码: A

Hybrid Diffractive-Refractive Optical System Design of Head-Mounted Display for Lightweight Night Vision

Zhang Huijuan¹ Wang Zhaoqi¹ Lu Zhenwu²

(¹ *The Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*
² *State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022*)

(Received 26 June 2003; revised 26 November 2003)

Abstract: According to the development of the lightweight night vision device in the world and accelerating the research of the lightweight night vision technique, a hybrid optical system of head-mounted display used for lightweight night vision is designed. The parameters of objective are $\pm 14^\circ$ field-of-view and $f=1.4$. This objective with one diffractive surface can be compatible with second and third generation image intensifying tube with size of 18 mm and planar type of input surface. The maximal value of distortion could be ignored for it is less than 0.5% of objective and can be used to accurately measuring and aiming. Considering the safety problem, A see-through monocular display system is designed to deliver the information of the image and the real world to human eye with a holographic combiner. The features of display the system are 15 mm (H) \times 10 mm (V) exit pupil size, 25 mm exit pupil and $[\pm 14^\circ(H)]\times[\pm 10^\circ(V)]$ field-of-view. The resolution and distortion of display system are 0.6 mrad and 3%, respectively, and it can be matched with display size of 18 mm.

Key words: applied optics; optical design; hybrid diffractive-refractive optical system; head-mounted display; lightweight night vision

* 国家自然科学基金(60277021)、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室资助课题。

E-mail: hjzhang@eyou.com

收稿日期: 2003-06-26; 收到修改稿日期: 2003-11-26

1 引 言

微光夜视是利用夜间月光、星光、大气辉光等自然微光工作^[1], 通过光增强技术大大改善人眼在黑暗环境下的视觉性能。微光夜视系统工作时, 不需要携

带光源,克服了主动红外夜视系统自身容易暴露的弱点,工作隐蔽、可靠,因而,在军事上得到了重点发展和应用。近年来,为了加强军队的数字化建设和提高部队的夜视能力,国际上加快了夜视头盔显示器的发展,相继出现了多功能、高性能的头盔显示器^[2~4]。国内的相关研究尚处于起步阶段及孤立状态,急需发展,以提高军方装备的战斗力与现代化水平。

微光夜视头盔显示器主要由微光物镜、像增强器和显示系统组成。微光物镜用来收集夜间外界视场的微光信息,并成像于像增强器的输入面上,其要求是具有较大的相对孔径,使像增强器的光电阴极输入面上能够得到足够的光通量。头盔用物镜多采用大相对孔径的基本型——双高斯型。像增强器(Image intensifying tube, IIT)为图像增强装置,其发展阶段从20世纪60年代开始已经历了三代,光灵敏度不断提高,光谱响应范围与夜天光更匹配。第三代像管加工工艺复杂,目前只有少数国家掌握技术,我国目前只能生产二代像管。显示系统起到目镜的作用,其出瞳大小和距离由人眼瞳孔的大小和位置决定。微光夜视头盔显示器光学设计包括微光物镜和显示系统的设计。

为适应国际上夜视设备的发展,促进我国夜视技术的研究,本文在分析微光夜视的实现手段,同时利用衍射元件负色散和实现任意相位调制能有效地简化系统结构、减轻重量等优势^[5~8],设计了折/衍混合微光夜视头盔的光学系统。

2 设计方案

由于头盔显示器佩戴在使用者头部,因而在设计时不仅要满足光学性能的要求,更多的还要考虑人的因素,同时要考虑夜间使用的安全问题。首先分析头盔显示器的结构,并结合上述需要确定夜视头盔的结构。

2.1 单通道和双通道比较^[9]

单通道头盔显示器只能得到微光物镜成像范围以内的信息,此类头盔显示器只适用于地面部队。双通道头盔显示器分为光学穿透式(optical see-through)和视频叠加式(video see-through),均可提供微光物镜成像范围以外的信息,安全性强,适合飞行员的使用。其中光学穿透式头盔显示器利用光学组合器实现内、外通道信息组合,基本不增加头部重量;而视频叠加式头盔显示器是利用摄像机对外部环境进行同步拍摄,与像增强器图像组合在一起,送

给头盔显示系统,摄像机的使用,增加使用者头部的重量,给使用者带来不适。

2.2 单目显示与双目显示比较^[10,11]

使用单目显示器使用者始终由一只眼直接观察外部,在夜间头盔突然失效的情况下,能够极快地适应外部黑暗环境,更加安全,同时可辅助观察头盔显示器视场外的物体,而且在重量上较双目系统轻将近1/2,减轻了使用者头部重量,有利于长时间飞行驾驶和空中操作。

根据以上分析、比较,对于飞行员用夜视头盔显示,设计穿透式双通道单目头盔显示器光学系统。

3 设计目标

参照国外微光夜视头盔显示器设计指标,确定本设计的目标参量为:

- 视场角:水平 $\pm 14^\circ$,垂直 $\pm 10^\circ$;
- 出瞳距离:25 mm;
- 出瞳尺寸:水平15 mm,垂直10 mm;
- 角分辨力不大于1 mrad;
- 显示(单眼):
- 第一通道:显示图像源信息
- 第二通道:直接观察外界。

4 光学系统设计结果

4.1 微光物镜的设计

1) 像增强器的特性

本设计采用国产的二代像管,主要特性参量为

- a) 输入、输出面有效直径: $\phi 18$ mm;
- b) 输入、输出面面型:平面;
- c) 输入面分辨力:32 lp/mm。

2) 设计参量

根据设计目标和像增强器特性,确定微光物镜的设计参量如表1所示。

Table 1 Parameters of objective

Parameter	Objective
Design wavelength /nm	867.22, 831.87, 721.27, 665.29, 560.82
Field-of-view /($^\circ$)	± 14
f	1.4
Size of image /mm	$\phi 18$
Resolution ratio /(lp/mm)	>32
Distortion /%	<3
Elements	<8

3) 设计结果

采用 ZEMAX 光学设计软件,选择双高斯物镜为基本设计结构,引入衍射光学元件,经过反复的迭代优化,最后得到满足各项指标的光学系统结构,如图 1 所示。设计结果共采用了 6 片透镜和一个衍射面,其中第三片透镜的平面为衍射面。

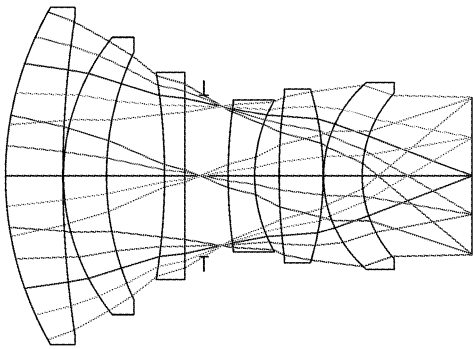


Fig. 1 The 2-D layout of objective (the planar surface of the third lens is diffractive surface)

图 2 为微光物镜的调制传递函数曲线,在 40 lp/mm 时,各视场仍有相当的调制度,同时满足二代像管输入面分辨力 32 lp/mm 和三代像管输入面分辨力 36 lp/mm 的要求,可兼容输入面尺寸为 $\phi 18$ mm、面型为平面的二代、三代像管。图 3 为微光物镜的场曲和畸变曲线,最大畸变小于 0.5%,可以忽略,用于夜间精确瞄准与测量。

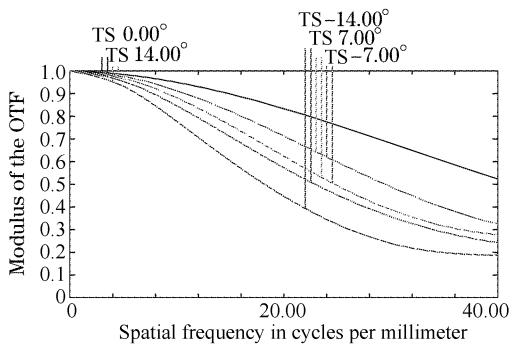


Fig. 2 The curve of modulation transfer function of objective

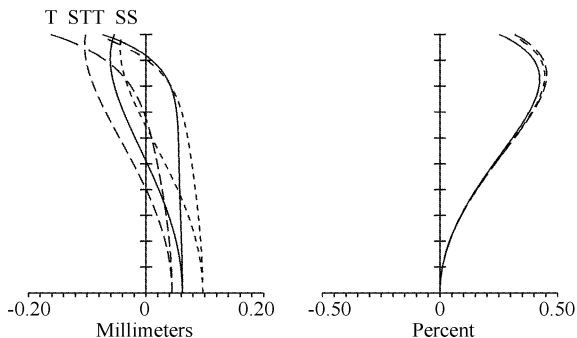


Fig. 3 The curve of field curvature and distortion of objective

4.2 显示系统的设计

1) 设计要求

a) 依据设计目标,显示系统的视场、出瞳距离和出瞳尺寸分别为: $[\pm 14^\circ (H)] \times [\pm 10^\circ (V)]$ 、25 mm 和 15 mm (H) \times 10 mm (V)。

b) 光能利用率:本设计采用全息组合器^[12~15],提高系统内、外通道的光能利用率,使外通道光能利用率大于 90%,内通道光能利用率大于 80%。

2) 设计结果

用 ZEMAX 软件进行设计优化。夜视图像的显示为准单色,设计波长为 550 nm、545 nm、540 nm。经反复迭代优化,最后得到满足要求的光学系统结构(图 4)。中继透镜组包含 3 片透镜和一个衍射面,中间透镜的平面为衍射面。系统中最上面的球面反射面有一倾斜,以实现光线两次经过全息组合器时,布拉格条件第一次不满足,第二次满足。而中继透镜组作整体偏心,为了补偿球面反射镜倾斜增加的像差。

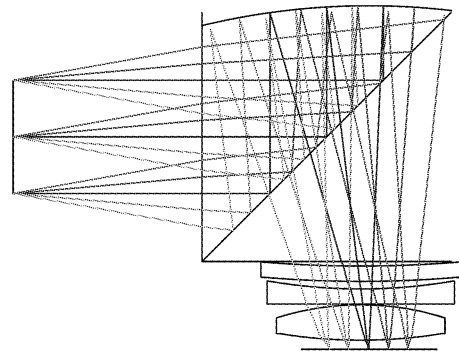


Fig. 4 The 3-D layout of display system

图 5 为头盔显示光学系统的调制传递函数曲线,在 30 lp/mm 时仍有相当的调制度。该曲线是在出瞳大小为 15 mm \times 10 mm 时得到的,对人眼正常瞳孔尺寸 2~6 mm,分辨力将更好。对于 0 视场,调制度为 0.3 时的分辨力为 28 lp/mm,对应角分辨力为 0.6 mrad,满足设计目标。图 6 为光学系统的场曲和

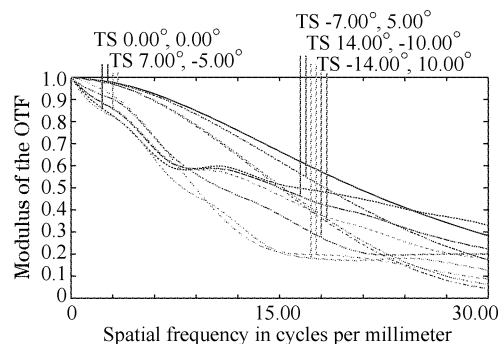


Fig. 5 The curve of modulation transfer function of display system

畸变曲线,畸变的最大值为 3%,对于目视系统,是完全允许的。

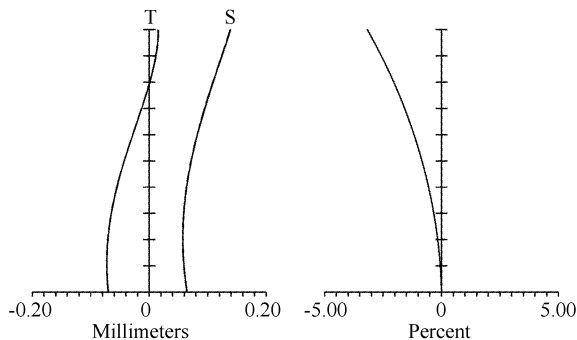


Fig. 6 The curves of field curvature and distortion of display system

结论 微光夜视利用光增强技术大大改善了人眼在微光环境下的视觉性能。为了适应国际上夜视设备的发展,促进我国夜视技术的研究,设计了折/衍混合穿透式双通道单目微光夜视头盔的光学系统。1) 微光物镜视场角为 $\pm 14^\circ$, $f=1.4$,由 6 片透镜和一个衍射面组成,设计结果可兼容输入面尺寸为 $\phi 18$ mm、面型为平面的二代和三代微光像增强器;最大畸变小于 0.5%,可用于夜间精确瞄准与测量。2) 显示系统采用穿透式双通道单目光学系统,特性参量为:出瞳尺寸为 15 mm (H) \times 10 mm (V)、视场为 $[\pm 14^\circ(H)] \times [\pm 10^\circ(V)]$ 、出瞳距离为 25 mm,双通道组合器采用全息组合器提高能量利用率,设计结果系统的角分辨力为 0.6 mrad,满足设计目标小于 1 mrad;畸变的最大值为 3%;系统结构紧凑,可与输出面尺寸为 $\phi 18$ mm的图像源相连。微光物镜和显示系统的设计结果满足微光夜视头盔显示器的要求。

参 考 文 献

- 1 Cameron A A. The development of the combiner eyepiece night vision goggle. *Proc. SPIE*, 1990, **1290**: 16~29
- 2 Bohm H D V, Schraner R. Requirements of an HMS/D for a night-flying helicopter. *Proc. SPIE*, 1990, **1290**: 93~107
- 3 Kent D. Lightweight helmet mounted night vision and FLIR imagery display systems. *Proc. SPIE*, 1995, **2465**: 68~80
- 4 Wilson G H, Mcfarlane R J F. The development of an aviators helmet mounted night vision goggle system. *Proc. SPIE*, 1990, **1290**: 128~139
- 5 Zhang Huijuan, Wang Zhaoqi, Fu Rulian *et al.*. Design of hybrid refractive-diffractive ultra-wide-angle 70° eyepieces. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(1): 85~88 (in Chinese)
- 6 Zhang Huijuan, Wang Zhaoqi, Li Fengyou *et al.*. The study of the hybrid refractive-diffractive singlet in the eyepiece. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(2): 236~239 (in Chinese)
- 7 Sun Qiang, Wang Zhaoqi, Li Fengyou *et al.*. Design on the athermal infrared diffractive/refractive optical system in $3.2\sim 4.5 \mu\text{m}$. *Optics and Precision Engineering* (光学精密工程), 2002, **10**(2): 121~125 (in Chinese)
- 8 Missing M D, Morris G H. Diffractive optics applied to eyepiece design. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(14): 2452~2461
- 9 Givens G S, Yona Z. Helmet-mounted display (day/night). *Proc. SPIE*, 1996, **2735**: 203~214
- 10 Moffitt K. Ocular responses to monocular and binocular helmet-mounted display configurations. *Proc. SPIE*, 1989, **1116**: 142~148
- 11 Lippert T M. Fundamental monocular/binocular HMD human factors. *Proc. SPIE*, 1990, **1290**: 185~191
- 12 Wood R B, Thomas M A. Holographic head-up display combiners with optimal photometric efficiency and uniformity. *Proc. SPIE*, 1990, **1289**: 50~62
- 13 Battey D E, Melzer J E. Holographic combiner design to obtain uniform symbol brightness at head-up display video camera. *Proc. SPIE*, 1989, **1117**: 178~186
- 14 Shahriar M S, Weathers W, Riccobono J. Holographic beam combiner. SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference Proceedings 2, 1999. 612~615
- 15 Rogers P J, Kirkham A J, Jeffs M *et al.*. HUD combiners giving enhanced IFOV/display brightness. *Proc. SPIE*, 1990, **1289**: 30~37