

〈系统与设计〉

机载头盔显示系统的主要光学实现形式

李训牛^{1,2}, 张竹平¹, 郑为建^{1,2}, 戴赋贵¹, 冯晓燕¹

(1.昆明物理研究所, 云南 昆明 650223; 2.北京理工大学光电学院, 北京 100081)

摘要: 头盔显示技术是当代有人驾驶战斗机技术的关键技术之一。简述了生物动力学、头部跟踪技术等头盔显示技术相关领域的研究成果。重点讨论了显示技术, 分析了非浸入式头盔显示的几种主要光学实现方式。对这些技术的基本原理、关键技术及发展概况进行了详细描述, 并讨论了其相对的优缺点。最后, 对适用于固定翼战斗机的头盔显示技术作了总结和展望。

关键词: 机载头盔; 头盔显示; 非浸入式头盔显示

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2016)06-0486-07

Summary of Airborne Helmet-mounted Display Optical System

LI Xunniu^{1,2}, ZHANG Zhuping¹, ZHEN Weijian^{1,2}, DAI Fugui¹, FEN Xiaoyan¹

(1.Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;

2.School of Optoelectronic, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Helmet-mounted display (HMD) technology is one of the key technologies of advanced manned fighter aircraft technology. This article analyzes the helmet display technology research in biodynamic features, head tracking technology and other aspects. The research focuses on the display technology, and analyzes several main optical implementations of see-through helmet-mounted display. A description of each technology is given along with a discussion of its basic theory, key technology, advantages and disadvantages. Finally, the article summarizes the Helmet-Mounted Display System (HMDS) technologies and the outlook.

Key words: airborne helmet, helmet-mounted display, see-through helmet-mounted display

0 引言

由于使用平视显示器(HUD)时, 飞行员视线受限于 HUD, 飞机若要跟踪目标需要随时转动, 才能将目标保持在视线范围内。为了克服 HUD 视场较小的缺点, 头盔显示器(HMD)技术由此得以发展。通过将显示器及光学系统置于头盔上, 飞行系统信息、瞄准标记和战场态势(分布式孔径系统(DAS)、雷达信息等)等信息可直接投射到飞行员眼前, 使飞行员随时观察所需的信息。利用惯性、光电等原理制作的头部跟踪系统(HTS)的使用, 使得武器(如空-空导弹)和各种传感器能够准确指向目标。同时具有头盔显示和瞄准功能的完整头盔显示瞄准系统(HMDS)在空战中起到了越来越大的作用^[1-4]。

20 世纪 60 年代, HMDS 的早期型式最先使用在 AH-1G 武装直升机上。经过数 10 年的发展, HMDS 由比较笨重、使用者感觉不舒服的初级系统发展到比较成熟的、武装直升机和战斗机都可列装使用的重要装备。

现代作战飞机装备的 HMDS 的最佳配置^[1-16]需要包括以下几点: ①双目显示; ②重量轻(<2.5 kg); ③高精度大范围头部跟踪; ④头部跟踪快速响应; ⑤高分辨率图像显示; ⑥机载及头盔显示传感器可选择(红外/可见光)。

上述配置称为 HMDS 设计的“黄金标准”。目前最符合这种设计标准的为 VSI 等公司生产的 F-35 的二代和三代 HMDS。

HMDS 的设计主要需要注意以下 3 个方面: 生物

动力学相关技术研究、头部跟踪和头盔显示技术。本文重点分析了显示技术的光学实现方式。

1 头盔显示相关的技术

1.1 生物动力学相关研究

与 HMDS 相关的生物动力学特征主要包括:头部承受重量和重量不平衡可能带来的机体损伤和疲劳、眩晕等感觉对工作效率的影响、头部承受一定碰撞对机体的影响及对应情况下的头盔设计。例如,对于直升机飞行员,有关机构研究指出^[9,11],在重量和重心极限范围内,允许重量和重心偏离的组合图见图1和图2。

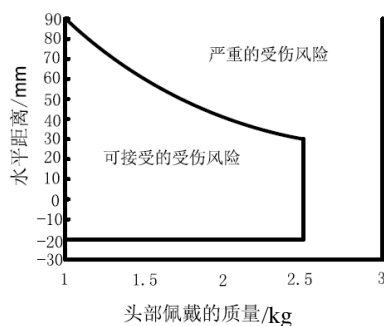


图1 水平重量-重心偏移曲线

Fig.1 Graph of longitudinal center of mass position curves

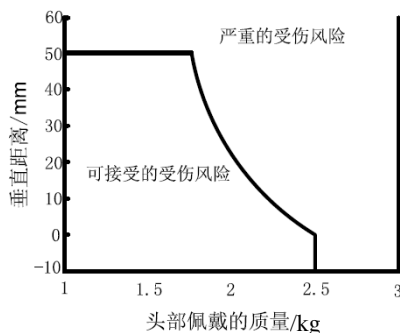


图2 垂直重量-重心偏移曲线

Fig.2 Graph of vertical center of mass position curves

头部碰撞阈值是另一个研究的领域^[4-5]。有关研究机构指出头部碰撞阈值为150~175g,头盔应在这种极限条件下提供碰撞缓冲^[4]。为了满足碰撞时的保护、重心平衡和显示器在大过载时的稳定性,带 HMDS 的头盔多采用内、外盔设计。常用激光扫描飞行员头部,测量到的精确数据用以完成头盔内衬的辅助设计和加工,以使得内盔更精确有效地贴合飞行员头部且佩戴舒适。外盔通常用来安装显示器及头部跟踪装置,并用高强度、轻质材料加工外盔。

1.2 头部跟踪技术

头部跟踪系统(HTS)利用光电或者惯性等方法,测量飞行员视线或者头部指向来确定飞行员瞄准线

相对机体的参数。受限于头盔的重量和体积,HTS 组件必须重量轻、体积小,并能装入到头盔中。目前用于 HTS 的技术主要有:惯性技术、电磁(EM)技术和光电(E0)技术。通常情况下为了同时满足跟踪精度和跟踪范围的要求,会考虑同时使用电磁和光电,或者惯性与光电2种形式^[5]。

1.3 微显示器

在早期研制的 HMD 中,图像源通常采用小型 CRT 管,其具有高亮度和高分辨率的优点。目前因 CRT 管在世界上大多数厂家都已停产,且存在体积大、重量和功耗大等缺点,使得设计者寻找新的显示器件。如 AMLCD(有源矩阵液晶显示器)、AMEL(有源矩阵电致发光显示器)、OLED(有机电致发光二极管)等许多技术都很有发展前景^[7,16-19]。

2 显示技术

要分析 HMDS 的显示技术,首先要分清楚 HMD 的光学结构。HMD 的光学结构根据作战需求来选择。主要分为:

1) 头盔瞄准具(HMS)型还是头盔显示器(HMD)型, HMS 视场一般 $<30^\circ$,单目结构;HMD 视场一般 $>40^\circ$,双目结构。

2) 单目还是双目结构,双目结构观察舒适度相对较高、但是成本较高。

3) 如果是双目结构,要使用的像源是1个还是2个,双像源多通过合像形成较大的观察视场,单像源视场相对小。

4) 白天使用、夜间使用还是昼/夜使用,使用条件决定了成像器件的选择方向。

受限于人的承受能力,需要对头盔显示系统的重量、重心作好控制。除了采用更轻的图像源外,还需从光学系统设计等角度控制 HMD 重量。但是,当飞机处于大机动或大过载飞行状态时,头盔相对滑动可能使图像丢失,为此必须加大光学系统出瞳直径($>14\text{ mm}$);为了能容纳护目镜或其他装备,光学系统出瞳距离也较大($>25\text{ mm}$)。如果按传统方法设计光学系统,则在这种情况下系统较重且重心偏移较大,会降低飞行员舒适度、增大疲劳感,并增大损伤颈椎的危险。因此需要打破传统的光学系统设计理念来设计头盔显示系统。

由于浸入式显示系统存在系统延迟,影响飞行员观察仪表等座舱信息的情况,导致了其系统无法适应有人驾驶固定翼战斗机。本文主要分析非浸入式显示技术。

非浸入式头盔显示技术主要有:

1) 折射/直视型头盔显示, 如图3所示。

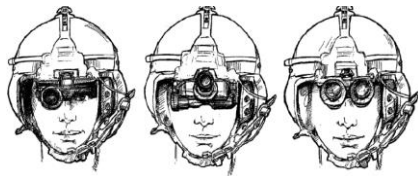


图3 单目单管、双目单管、双目双管折射/直视型头盔显示效果图

Fig.3 Monocular, bi-ocular and binocular goggle (occluded display)

该型式的头盔显示器通常的技术指标如下:

①像增强器: 超二代/三代/四代像增强器; ②自动脱落: 机械解脱; ③放大率: 1倍; ④视场: 40°。其优点主要有: 技术成熟, 设计, 加工, 装调简单。其缺点为: 通视视场受到遮挡, 影响平视显示器的观察; 重量大, 重心靠前, 需要配重, 在飞机大过载情况下使飞行员承受较大的过载; 弹射时需要解脱, 影响弹射安全^[10]。

2) 基于棱镜分光的型式。

该型式与自由曲面棱镜技术类似, 但其使用长出瞳目镜加棱镜分光的型式实现非侵入显示, 图4为棱镜分光型式光学原理图。该型式技术条件相当成熟, 结构简单。其缺点主要是受系统体积、重量控制, 显示视场和通视视场都相对较小, 佩戴在头盔上时重心靠前, 双目使用时则严重影响通视视场观察, 弹射时需要解脱。

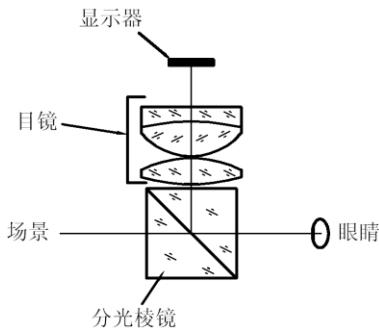


图4 棱镜分光型式光学原理图

Fig.4 Formation of a virtual image by a prism

3) 基于自由曲面棱镜技术的头盔显示技术^[20-21]。

其光学结构原理图如图5。图中S代表面, E代表元件。由于自由曲面大多采用非对称结构, 极大地提高了光学面改善像质的能力, 使得系统可以设计得紧凑、轻巧。该型式系统的主要优点为结构紧凑、轻巧。缺点主要有: 该型式适合单目显示, 与目前头盔显示技术追求双目显示的技术发展方向不符, 双目显示时需要2个棱镜, 则会影响通视视场, 或者加工一个较大的面罩或拼接棱镜, 实现困难, 重量难以控制。

4) 光导型头盔显示技术。利用全息波导平板显

示技术的原理^[22-24], 如图6所示。

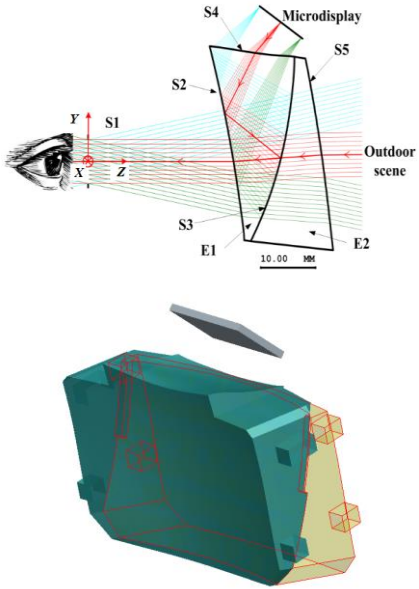


图5 自由曲面棱镜头盔显示系统光学原理图和结构示意图

Fig.5 Diagram of HMDS use freeform surface and structure of optical system

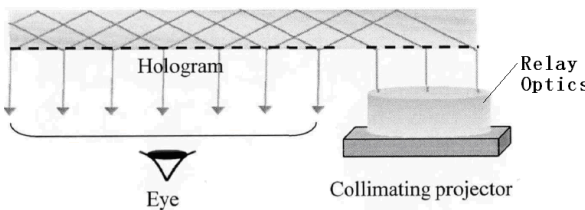


图6 全息平板显示原理图

Fig.6 Schematic of holographic waveguide HMD

源图像由经中继光学系统准直输出, 光线经过全息光栅耦合后进入平板波导, 并在波导中以全反射形式传播; 光在波导中多次全反射, 经透射光栅调制而由波导中出射至人眼, 成像到视网膜^[22]。如果两个全息光栅具有相同的设计周期, 可以解决窄带光源的色散等问题^[23]。典型的形式如BAE公司的Q-Sight, 如图7^[25-26]。

全息波导头盔显示技术由于具有常规头盔显示技术所不具备的多种优势(如重量轻、体积小等)。然而, 全息波导显示技术也面临着许多难题, 如高质量的全息光栅制造难度大, 难以实现彩色显示, 不同视场的像差和亮度差异大, 光源利用率低等^[23]。目前, 英国BAE公司在全息波导显示领域走在世界最前面, 其Q-Sight头盔显示器已经大规模投入军用。Q-Sight头盔显示器采用的大功率绿光LED需要进行窄带滤波^[25-26], 对单色性的高要求使得系统分辨率一定程度地降低。目前, Q-Sight已经有多个系列产品, 其主要性能参数如表1所示^[25]。



(a) Q-Sight 全息波导显示器 (b) Q-Sight 远程瞄准系统

图7 BAE公司的Q-Sight Fig.7 Q-Sight of BAE company

表1 Q-Sight 主要性能参数

Table 1 Performance of Q-Sight system

	Performance	Comment
Luminance	1800 ftl	In daylight condition
Contrast ratio	1.2:1	Maintained with dark visor
Exit pupil	>35 mm	Very large eye box
Eye relief	>25 mm	
Power consumption	<5 W	Total 10 W man-mounted
Head-mounted mass	Head-mounted	
Optical design	<4 oz	Expandable to 40 °FOV
	30 °FOV, monocular	

该型式具有重量轻,结构简单,弹射安全等优点。其缺点是:光导型头盔显示技术对图像源即微显示器有较高要求,OLED、LCD等显示器件难以满足要求;需要光源具有较强的单色性,导致图像降低了人观察的舒适度和辨别率^[27];受衍射效应、加工能力(国内)的限制,难以做到大视场,其视场通常只能满足HMS的要求,显示瞄准视场内的目标,而非人眼观察较舒适的40°以上的视场。

5) 目前服役使用较多且在较先进战斗机上使用的头盔显示器的型式主要由:微显示器、中继光学系统和光学组合玻璃3部分组成^[1-2],图8为F35一代HMDS系统原理图。

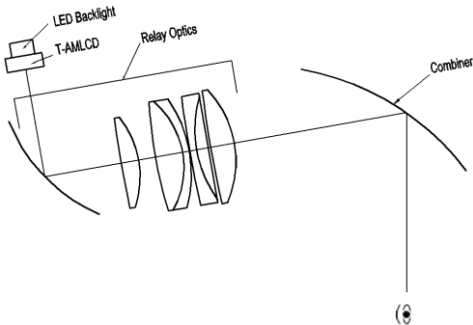


图8 F35一代HMDS系统光学原理图

Fig.8 Schematic of optical system of HMDS of F35 Generation I

该型式可通过双目接收不同的视场信息以扩大视场,亦可以双目接收同一个视场信息。双目合像常用的光学系统型式如图9。

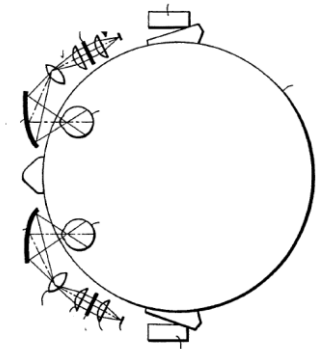


图9 光学原理图

Fig.9 Schematic of HMD's optical system

如图10,该形式通常通过合像^[10,27]形成大于40°×30°的视场,通视视场受到组合器边缘的影响。F35第一代HMDS亦使用类似的设计,但是由于护目镜组合器的原因,可以见到护目镜组合器接口处的一条竖线,影响飞行员观察和驾驶安全。其产品形式常如图11所示。

另一种是单图像源的型式,如F35二代、三代头

盔显示器，如图 12。

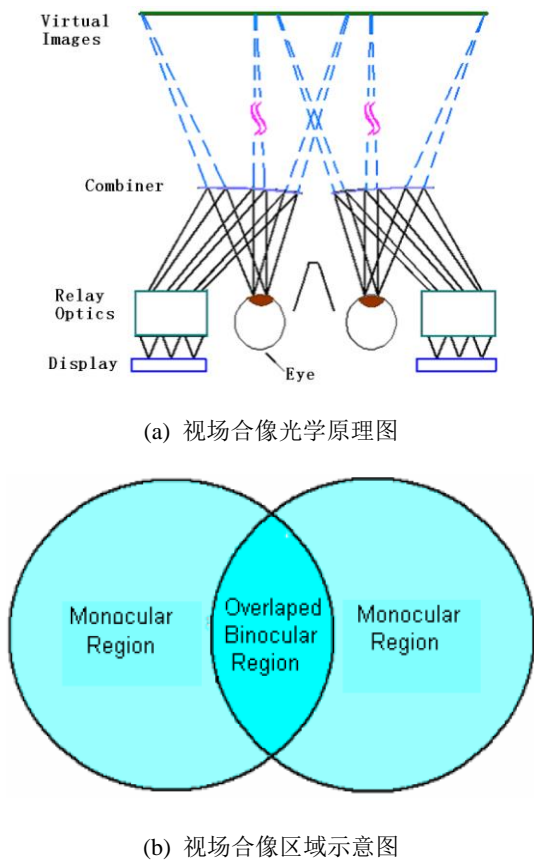


图 10 双目合像原理及合像示意图
Fig.10 Principle of binocular image



图 11 双图像源合像的常见产品形式
Fig.11 See-through display in binocular design



图 12 F35 二代头盔显示器

Fig.12 Schematic of optical system of new HMDS of F35
该型式目前表现良好。该型式通过护目镜面罩反

射或者在护目镜内安装一个组合器反射中继光学系统转出的微显示器的图像信息，达到人眼，并成像于视网膜。其光学原图如图 13。由于该型式存在较大的光线折转，所以，该型式多采用离轴、倾斜设计，且会使用一定量的二元光学元件（BOE）或者全息光学元件（HOE）以保证像质^[28-29]。其较一代主要优点是使用相同的图像源显示在 2 个显示器上，这样就不存在视场叠加带来的问题。即将图像源位置略作调整后，光学系统得到了改善，能满足较大视场的要求，且通视视场不受光学系统的影响。该型式的缺点即为重量相对较大，加工装调较困难，多数情况下需要给每个飞行员定制整个头盔，头盔的通用性、互换性较差。

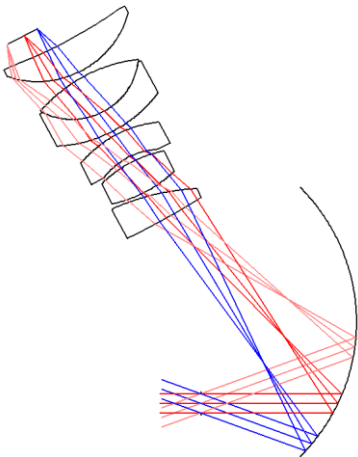


图 13 头盔显示光学原理图
Fig.13 Schematic of HMDS's optical display system

3 总结和展望

随着技术的发展，在有人驾驶战斗机领域，HMDS 技术将得到广泛的应用。考虑人的承受能力，跟踪技术的精度，HMDS 是否适用的关键集中在显示器件部分的重量，体积，重心的控制，像质的好坏等^[30]。因此，研究 HMDS 技术需要从飞行员的适应性、瞄准跟踪技术需要的精度，弹射安全的角度来综合考虑使用哪种显示技术。现阶段，国外较成熟的技术典型的为 BAE 公司使用光波导技术制造的 Q-Sight 头盔瞄准系统，美国 F35 使用护目镜型头盔显示技术的最新一代头盔显示器。从像质来说，护目镜型式头盔显示器占优，但其重量较大，加工，装调难度大，需要针对飞行员单独定制。从体积重量上来说，Q-Sight 占优，但其像质是靠对显示器件单色性的较高要求达到的，且视场较小，通视视场受到影响，多使用单目显示来作为瞄准使用，难以叠加清晰的目标图像信息。另外，其他的一些产品大多较重，>1.8 kg，不适合高过载的战斗机，多用于直升机或者运输机做辅助驾

驶和瞄准用。

从头盔显示器使用的光学原理和头部跟踪技术的原理来说,非浸入式头盔显示器的实现途径有光导式和护目镜型式2种。而若考虑双目显示,则护目镜式占优。所以,在短期内,护目镜式头盔显示技术将得到较快的发展。而光导式头盔显示器受到光学衍射效应的限制,现阶段加工技术难以使得光导式头盔显示器在比较宽的波段内显示图像,且视场较小。相信随着光学加工技术的进一步发展,这些难题将得到一定程度的解决。

参考文献:

- [1] Rolland J P. Wide-angle, off-axis, see-through head-mounted display[J]. *Opt. Eng.*, 2000, **39**(7): 1760-1767.
- [2] 王辉,刘春华,王永生. 头盔显示系统评述[J]. *电光与控制*, 2012, **19**(8):45-49.
WANG Hui, LIU Chunhua, WANG Yongsheng. Comments on helmet-mounted display system[J]. *Electronics Optics and Control*, 2012, **19**(8): 45-49.
- [3] James P, Mcguire Jr. Next-generation head-mounted display[C]//*Proc. of SPIE*. 2010, **7618**: 761804-1.
- [4] Merhav S, Velgert M. Compensating sampling errors in stabilizing helmet-mounted displays using auxiliary acceleration measurements[J]. *AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 1991, **14**(5): 1067-1069.
- [5] 陆南燕. 头盔显示器的关键技术及有关设计问题综述[J]. *红外与激光工程*, 2002, **31**(3): 237-243.
LU Nan-yan. Review on critical technologies and design-related problems of HMD[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2002, **31**(3): 237-243.
- [6] Hans-Ullrich Doehler. Improving visual-conformal displays for helicopter guidance[C]//*Proc. of SPIE*, 2013, 10.1117/2.1201310.005162.
- [7] Ronald A Belt, Gary R Knowles, Erik H Lange, et al. Miniature flat panels in rotary wing head mounted displays[C]//*Proc. of SPIE*, 2010, **7663**: 09-1-09-10.
- [8] Yan Long, Chen Chengjun. Research on helmet-mounted sight system model and simulation[C]//2012 *IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE)*, 2012, **1**: 42-45.
- [9] 王永年. 头盔显示器的任务、现状、研究方向[J]. *电光与控制*, 1999(2): 1-9.
Wang Yong-nian. Overview of Helmet-mounted Display[J]. *Electronics Optics and Control*, 1999(2): 1-9.
- [10] En Guzulescu, M Equipment. Display solutions of optoelectronic systems imagery[J]. *Megabyte Magazine*, 2009, **5**(1): 20-27.
- [11] John Hericks, Michael Parise, Jack Wier. Breaking down the barriers of cockpit metal in magnetic tracking[C]//*Proc. of SPIE*, 1996, **2735**: 150-155.
- [12] Buddy Blanton. Hybrid head-tracker examined for the high accuracy attack rotorcraft macket[C]//*Proc. of SPIE*, 2002, **4711**: 117-123.
- [13] J Alejandro Betancur, Gilberto Osorio Gómez, J David Agudelo. Head-up and head-down displays integration in automobiles[C]//*Proc. of SPIE*, 2014, **9086**: 90860S-1.
- [14] Ma Lili, Chen YangQuan, Kevin L Moore. 51Flexible camera calibration using a new analytical radial undistortion formula with application to mobile robot localization[EB/OL]. <http://arxiv.org/abs/cs.CV/0307045>.
- [15] Robert Atac, Eric Foxlin. Scorpion hybrid optical-based inertial tracker (HObIT)[C]//*Proc. of SPIE*, 2013, **8735**: 873502-1.
- [16] Ollie Woodard, Ronald Gale, Colin Reese. The Colorization of solid state AMLCD's for military head mounted displays (HMDs) and other viewer applications[C]//*Proc. of SPIE*, 2003, **5079**: doi:10.1117/12.487872.
- [17] Darrel G Hopper, William K Dolezal. Draft standard for color AMLCDs in U. S. military aircraft[C]//*Proc. of SPIE*, 1994, **2219**: 230-241.
- [18] 李延东, 杨俊彦, 李亚文, 等. AM-OLED 微型显示器在红外系统中的应用[J]. *红外技术*, 2012, **34**(4): 200-204.
LI Yandong, Yang Junyan, LI Yawen, et al. Application of AM-OLED microdisplay in infrared display systems[J]. *Infrared Technology*, 2012, **34**(4): 200-204.
- [19] 刘涛, 赵国荣, 刘方正. 透反液晶显示器在头盔显示器中的应用[J]. *红外技术*, 2006, **28**(4): 227.
LIU Tao, ZHAO Guorong, LIU Fangzheng. Application of transreflective LCD in helmet-mounted display[J]. *Infrared Technology*, 2006, **28**(4): 227.
- [20] 王涌天. 自由曲面光学系统设计及其应用[J]. *光学与光电技术*, 2012, **10**(3): 13-16.
WANG Yongtian. Design and application of free-curved surface optical system[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2012, **10**(3): 13-16.
- [21] 杨波, 韦晓娜, 张薇, 等. 大出瞳自由曲面头盔显示器光学系统的设计方法[J]. *光子学报*, 2011, **40**(7): 1051-1054.
YANG Bo, WEI Xiaona, ZHANG Wei, et al. Design method of a free-form HMD system with large pupil size[J]. *Acta Photonica Sinica*. 2011, **40**(7): 1051-1054.
- [22] 曾飞, 张新, 张建萍, 等. 基于棱镜-光栅结构的全息波导头盔显示系统设计[J]. *光学学报*, 2013, **33**(9): 0909001-1-0909001-6.
Zeng Fei, Zhang Xin, Zhang Jian-ping et.al. Holographic Waveguide Head-Mounted Display System Design Based on Prisms-Grating Structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, **33**(9): 0909001-1-0909001-6.
- [23] 刘辉. 基于平板波导的头盔显示技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
Liu Hui. Research on Head-Mounted Display Based on Planar Optical

- Waveguide[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [24] 曾飞, 张新. 全息波导头盔显示技术[J]. 中国光学, 2014, **7**(5): 731-738.
- ZENG Fei, ZHANG Xin. Waveguide holographic head-mounted display technology[J]. *Chinese Optics*, 2014, **7**(5): 731-738.
- [25] Simmonds, Michael David. The Application of holographic optical waveguide technology to Q-Sight™ family of helmet mounted displays[C]//*Proc. of SPIE*, 2009, **7326**: 73260H-1
- [26] Simmonds, Michael David. WAVEGUIDES: US US20110242670[P]. 2011-06-08.
- [27] 李晓霞. 双目头盔显示器光学设计中双目叠加的探讨[J]. 电光与控制, 1998(2): 37-40.
- LI Xiaoxia. Research of overlap method in binocular helmet-mounted display system optical design[J]. *Electronics Optics and Control*, 1998(2): 37-40.
- [28] 白瑜, 邢廷文, 蒋亚东, 等. 基于衍射光学的头盔显示光学系统[J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(10): 2753-2757.
- BAI Yu, XING Tingwen, JIANG Yadong, et al. Design of head-mounted display optical system with DOE[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(10): 2753-2757.
- [29] 李华, 张新, 王超, 等. 自由曲面机载头盔显示器光学系统设计[J]. 光学学报, 2014, **34**(3): 0322001-1-6.
- LI Hua, ZHANG Xin, WANG Chao, et al. Optical design of an avionic helmet-mounted displays using freeform surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(3): 0322001-1-6.
- [30] 赵顺龙. 投影式头盔光学系统设计及视空间的性能评价研究[D]. 天津: 南开大学, 2006.
- Zhao Shun-long. Head-mounted projective display's optical system design and optical assessment of visual space[D]. Tianjin: Nankai University, 2006.

(上接第 460 页)

参考文献:

- [1] 周慧鑫, 殷世民, 刘上乾, 等. 红外焦平面器件盲元检测及补偿算法[J]. 光子学报, 2004, **33**(5): 598-599.
- ZHOU H X, YIN S M, LIU S Q, et al. Algorithm of Blind Pixels Auto-searching and Compensation for IRFPA[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5): 598-599.
- [2] 冷寒冰, 宫振东, 谢庆胜, 等. 基于模糊中值的 IRFPA 自适应盲元检测与补偿[J]. 红外与激光工程, 2015, **44**(3): 821-825.
- LENG Hanbing, GONG Zhendong, XIE Qingsheng, et al. Adaptive blind pixel detection and compensation for IRFPA based on fuzzy median filter[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(3): 821-825.
- [3] 白俊奇, 蒋怡亮, 赵春光, 等. 红外焦平面阵列探测器盲元检测算法研究[J]. 红外技术, 2011, **33**(4): 233-235.
- BAI Jun-qi, JIANG Yi-liang, ZHAO Chun-guang, et al. Blind-pixel detection algorithm for infrared focal plan array detector[J]. *Infrared Technology*, 2011, **33**(4): 233-235.
- [4] 张熙宁. 一种改进的红外焦平面阵列盲元检测算法[J]. 激光与红外, 2010, **40**(10): 1149-1153.
- ZHANG Xining. Improved blind element inspection algorithm of infrared FPA array[J]. *Laser & Infrared*, 2010, **40**(10): 1149-1153.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 17444-2013. 红外焦平面阵列参数测试方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Measuring methods for parameters of infrared focal plane arrays[S]. Beijing: China Standard Press, 2014.