

文章编号 : 0253-2239(2002)10-1251-04

用于微电子硅芯片液晶显示的反射式中继目视系统*

王肇圻¹⁾ 张慧娟¹⁾ 母国光¹⁾ 卢振武²⁾ Cartwright C M³⁾ Gillespie W A³⁾

- (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, 国家应用光学重点实验室, 长春 130022
(3), EPI Centre, University of Abertay Dundee, UK

摘要: 设计了用对角为 18 mm 的微电子硅芯片液晶显示器、60°视场角的反射中继头盔显示系统。该系统由一个常用的艾尔弗(Erfle)接目镜和一个反射中继镜组成。反射中继镜和接目镜的场曲异号, 因此相互部分抵消, 系统具有较小的场曲和像散。中继系统的采用, 不仅保证了头盔显示的特定规格要求, 诸如出瞳直径和出瞳距离, 而且为反射式微电子硅芯片液晶显示器的照明光源提供了空间。该系统像差较小, 尺寸和重量合理, 适用于特定用途的头盔显示。

关键词: 头盔显示器; 微显示器件; 目镜

中图分类号: TB851+.9 文献标识码: A

1 引 言

当前光显示特别是利用微型器件的光显示得到迅速的发展, 并成为世界经济和科学研究的一个重要热点。原因有两方面: 1) 光电子技术的发展使得各种微显示器的性能得到极大的提高, 为各种应用提供了可能; 2) 背投式电视(光引擎)、立体头盔显示等光显示有巨大的市场, 将成为今后一、二十年内世界经济的一个重要增长点。世界各发达国家如美国、日本、欧洲等加紧了在这一领域的研究和开发。

在微显示器件方面各具特色的新型器件正在研制和开发中, 包括自发光器件的有机发光二极管(OLED)、透射式器件的有源矩阵薄膜晶体管液晶显示(AMTFT LCD)、反射式器件的微电子硅芯片液晶显示(LCOS)并相继进入市场^[1]。新型的微电子硅芯片液晶显示是一种反射式的微显示器件, 由于它的具有竞争力的价格-性能比, 将在近几年内被广泛地接受并销售量将快速增长。

较低分辨率的微电子硅芯片液晶显示器主要用于摄像机的取景器, 这一类应用已经较为成熟。近几年迅速发展起来的电视投影系统和头盔目视系统

要求更高分辨率的微电子硅芯片液晶显示器, 而对相应的光学系统也有相对高的新要求。例如在投影系统中要求大视场和大数值孔径, 在头盔系统中要求大视场、大出瞳直径和长出瞳距离。

微显示器件的小尺寸, 给头盔显示器带来根本的变化^[2-6]。由于小尺寸显示器在某些应用中, 特别是在“直接看”模式中可以不用中继镜, 而使系统变小变轻, 即使在需要合成器和中继系统的“穿透看”模式中, 微显示器的引入也使系统大大变轻变小。然而微显示器的尺寸要和相继的光学系统相匹配。微显示器的尺寸越小, 成本就越低, 但相继的光学系统的有效焦距就要变小, 以满足特定的视场角, 这使光学系统变得复杂。对于反射式的微显示器还要考虑照明光源的放置。

Spatia Light Inc 公司生产的微电子硅芯片液晶显示器微显示器尺寸为对角 25 mm、20 mm 和 18 mm 的规格, Micro Vue 公司生产的微电子硅芯片液晶显示器微显示器尺寸为对角 18 mm。不同用途的头盔显示器对视场角、出瞳直径、和出瞳距离的要求不同。对于娱乐和立体显示的虚拟现实的应用, 视场角应大于 60°, 出瞳直径大于 8 mm, 出瞳距离大于 18 mm。对于对角为 18 mm 的微显示器, 上述指标对相应的光学系统来说是相当困难的。这是因为视场角和微显示器的尺寸决定了目视系统的焦距, 而小焦距限制了出瞳直径和出瞳距离。在一定的出瞳直径和出瞳距离条件下, 一个对特定焦距合适的目视系统, 要使

* 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所国家应用光学重点实验室和英国丹弟·阿巴特大学光子光子信息控制中心资助课题。

E-mail: wangzq@nankai.edu.cn

收稿日期 2001-09-28; 收到修改稿日期 2001-11-30

其满足更小的有效焦距条件,往往使系统要求更高的制备工艺并且像质变坏。

为了解决视场角、有效焦距和出瞳间的矛盾关系,人们在光学系统中引入非球面和折-衍混杂系统,然而仍存在一定的困难。例如用非球面系统和折-衍混杂系统实现的 60° 视场角的头盔显示^[7],其有效焦距为24 mm,出瞳直径和出瞳距离分别为12 mm和20 mm。这样一个系统要求的微显示器件的尺寸为28 mm。对于上述不同规格的微电子硅芯片液晶显示器仍不满足要求。

本文提出用反射式中继镜将微电子硅芯片液晶显示器的图像放大2倍后接一个合适的目镜。目镜选为最常采用的大视场艾尔弗目镜,其焦距为30 mm,出瞳直径为8 mm,出瞳距离为20 mm。采用反射式中继镜是为了减小目视系统的总重量和尺寸。对所设计的目视系统的像差分析表明,该系统满足彩色头盔显示器的一般要求,而系统的尺寸也较为合理。对角为18 mm的微显示器适合于该系统。

2 艾尔弗目镜

艾尔弗目镜是一类视场较大、结构较为简单、最为通用的光学系统。它的前三片镜为基本结构,而后两片为校正结构。它由靠近像面的双胶合负透镜来校正场曲和增加出瞳距离。

图1是一典型的焦距为30 mm的艾尔弗目镜及其像差特性曲线。其出瞳直径为8 mm,出瞳距离为20 mm。该目镜适合于对角尺寸36 mm的微显示器。图1(b)为垂轴像差曲线,标度为 $\pm 500 \mu\text{m}$ [图2~图4的(b)均同],可看出它的垂轴像差在 0° 视场时很小,仅 $40 \mu\text{m}$,而在 60° 视场时也小于 $260 \mu\text{m}$ 。其最大场曲为1 mm,对应于小于1.1的屈光度。其畸变小于14%,这对 60° 的大视场目镜是可接受的。

艾尔弗目镜的出瞳直径和出瞳距离随焦距的变小而减小,表1给出了特定类型的艾尔弗目镜在不同视场角下出瞳直径、出瞳距离与焦距的关系。

Table 1. The relationship of the field of view, focal length, exit pupil diameter and eye relief of the Erfle eyepiece

field of view / ($^\circ$)	efficiency focal length / mm	exit pupil diameter / mm	eye relief / mm
25	34	17.0	30
	48	24.0	45
35	24	12.0	20
	33	16.0	30
45	18	9.0	15
	25	12.0	22
55	14	5.5	12
	20	7.0	18

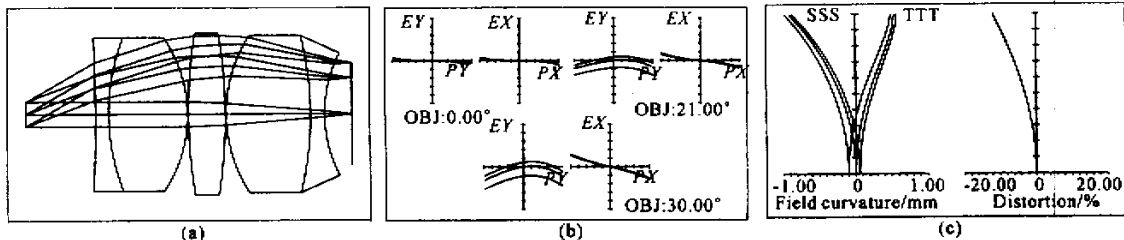


Fig. 1 Erfle eyepiece with 30 mm focal length. (a) 2-D layout ;(b) Transverse ray fan plot ;(c) Field curvature and distortion

而对于一个特定出瞳直径、出瞳距离和焦距的艾尔弗目镜,若要缩小其焦距,必将使目镜结构和像差变坏。例如上面所述的焦距为30 mm、出瞳直径

为8 mm、出瞳距离为20 mm的艾尔弗透镜,当把焦距缩为23 mm时,目镜的曲率变大(如第七个面的曲率半径由43 mm变为30 mm),直径变大(由

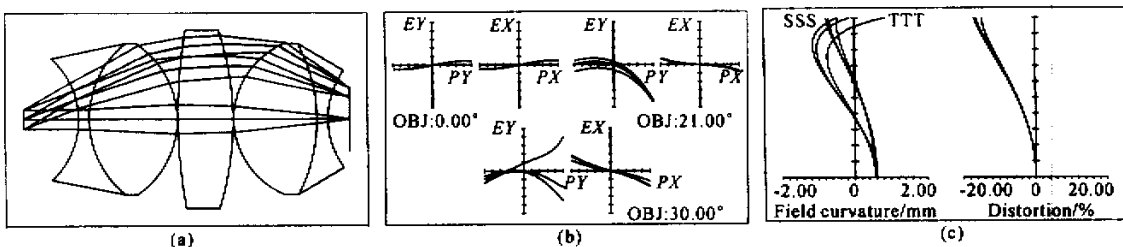


Fig. 2 Erfle eyepiece with 23 mm focal length. (a) 2-D layout ;(b) Transverse ray fan plot ;(c) Field curvature and distortion

46 mm变为 66 mm),而对于双目系统目镜直径需小于 46 mm。同时像差也变坏,如图 2 所示。因此不能采用简单缩小焦距的办法来适应微电子硅芯片液晶显示器的特定规格的尺寸。

3 反射中继系统

如上所述,当把一个具有合适出瞳直径、出瞳距离和透镜直径、焦距为 30 mm 的艾尔弗目镜,在保证出瞳直径和出瞳距离不变的情况下,改为焦距为 15 mm 的艾尔弗目镜,其结构和像差特性几乎是不可接受的。而对于一个对角为 18 mm 的微电子硅芯片液晶显示器相应的目视系统若要保证 60° 的视场角,其焦距只能小于 15 mm。为适应特定的微显示器尺寸,只能采用一个中继系统,将微显示器的像

放大。同时,对于反射式的微电子硅芯片液晶显示器来说还需一定的空间放置照明光源,而艾尔弗目镜由于校正结构十分接近像面,若无中继系统,照明设置有相当的困难。

本文设计了一个反射式的中继系统,其结构和像差特性如图 3 所示。它由一个凹面反射镜、半透半反镜、光阑、和物、像两平面构成。改变光阑位置,可以优化系统成像特性。它可将一个 18 mm 的物放大为 36 mm。从像差曲线上可以看出,其最大场曲为 0.7 mm,垂轴像差在 0° 视场时小于 10 μm,最大视场时小于 230 μm。该系统是满足目视系统对于场曲、畸变以及垂轴像差的要求的。特别是从场曲曲线可以看出,它的子午场曲和弧矢场曲均与艾尔弗目镜相反,因而可以相互补偿。

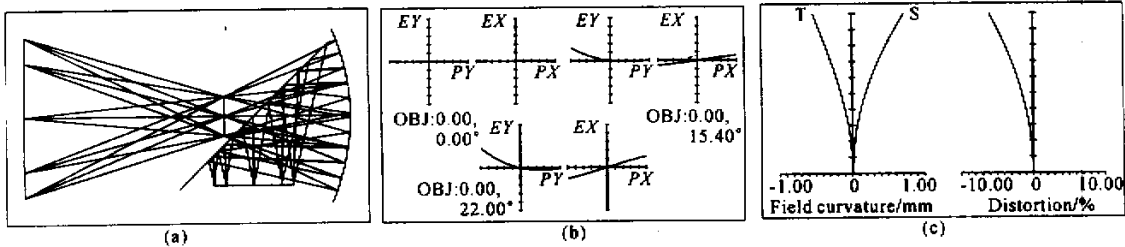


Fig. 3 Reflective relay system. (a) 3-D layout; (b) Transverse ray fan plot; (c) Field curvature and distortion

4 反射式中继目视系统

将上面设计的焦距为 30 mm 的艾尔弗目镜和反射式中继镜连接起来即形成反射式中继目视系统,适用于对角尺寸为 18 mm 的微显示器。然而简单的连接有一定的问题:从中继系统出射的大视场的成像光束,到达目镜系统时,边缘光线将逸出。因此,需在系统中加一合适的场镜,以收集成像光线。图 4 给出了这样的系统及其像差特性曲线。该系统从出瞳到球面反射镜的长度为 158 mm,直径为 46 mm,有效焦距为 16 mm,出瞳直径为 8 mm,出瞳

距离为 20 mm。可以看出垂轴像差相对于单一艾尔弗目镜系统有所增加,但增加不多。畸变略有增加,增加了 1.5%。然而像散却有改善,由艾尔弗目镜 1.5 mm 的减小为 1.0 mm。这是由于中继系统和目镜系统场曲符号相反,因而部分互相抵消的结果。该系统最大场曲为 60° 视场时的子午场曲 $x = 0.7$ mm。根据牛顿公式:

$$xx' = ff', \quad (1)$$

以及屈光度定义:

$$D = \frac{1000}{x'}, \quad (2)$$

上述的场曲对应于屈光度变化量为 $D = 2.7$,这对

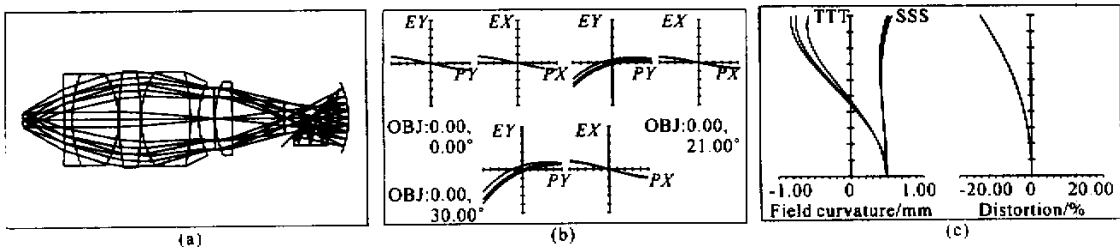


Fig. 4 Optical system with Erfle eyepiece and reflective relay. (a) 3-D layout; (b) Transverse ray fan plot; (c) Field curvature and distortion

于 60° 视场是可以接受的。对于用微电子硅芯片液晶显示器的头盔显示器,采用中继镜不但是对角 18 mm 的特定尺寸的需要,也是反射式微显示器件放置照明光源所要求。由于采用了反射中继系统,本文所设计的目视系统中有充分的空间放置照明光源。

结论 本文给出由一个合适的艾弗目镜和一个反射式中继镜构成的用于对角为 18 mm 微电子硅芯片液晶显示器的 60° 视场的头盔系统,该系统具有特定的应用。中继镜的引入不仅可获得满意的出瞳直径和出瞳距离,并且降低了系统的像散。另外也为微电子硅芯片液晶显示器的照明光源提供了空间。所设计的系统具有像差较小、尺寸和重量合理的特点,适用于特定用途的头盔显示。虽然本文的设计是针对对角 18 mm 显示器的,其设计思想对对角 20 mm 和对角 25 mm 的显示器的头盔系统设计也有借鉴。

参 考 文 献

- [1] Prache O. Active matrix molecular OLED microdisplays. *Displays*, 2001, **22**(2):49~56
- [2] Ferrin F. J. Current issues in helmet mounted display systems for military applications. *Proc. SPIE*, 1998, **3362**:71~79
- [3] Frank J. F. An update on optical system for military head mounted displays. *Proc. SPIE*, 1999, **3689**:178~185
- [4] Bunkenburg J, Feritz T A. Innovative diffractive eyepiece for helmet-mounted display. *Proc. SPIE*, 1998, **3430**:41~49
- [5] Cameron A A. Visor projected helmet mounted displays technology and application. *Microprocessors and Microsystems*, 1999, **22**(8):465~475
- [6] Ferrin F J. Selecting new miniature display technologies for head-mounted applications. *Proc. SPIE*, 1997, **3058**:115~124
- [7] Knapp W, Blough G, Khajurivala K *et al.*. Optical design comparison of 60° eyepiece: One with a diffractive surface and one with aspherics. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(20):4756~4760

Head-Mounted Display With Reflective Relay System Using Micro-Liquid Crystal On Silicon

Wang Zhaoqi¹⁾ Zhang Huijuan¹⁾ Mu Guoguang¹⁾ Lu Zhenwu²⁾
Cartwright C M³⁾ Gillespie W A³⁾

- (1), Institute of Modern Optics, Nankai University; The Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology, MOE, Tianjin 300071
- (2), State Key Lab of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022
- (3), EPICentre, University of Abertay Dundee, UK

(Received 28 September 2001; revised 30 November 2001)

Abstract: A head-mounted display, which combines a Erfle eyepiece with a reflective relay system and uses a micro-display of the reflective liquid crystal on silicon with the diagonal size 18mm, has been designed. The sign of the field curvature, either the sagittal or the tangential, of the relay system is on the contrary to that of the eyepiece, which makes the system possess smaller field curvature and astigmatism. The adoption of the relay lens makes the system not only suitable for the micro-display with smaller size but also offering enough space for light source in the reflective micro-display. The system is with smaller aberration, enough exit pupil diameter and eye-relief, and reasonable size and weight in the specific application of head-mounted display.

Key words: head-mounted display; micro-display; eyepiece