

文章编号:1007-2780(2009)03-0377-06

空间用液晶显示器关键技术研究

董 戴,沈 威,张 涛,沈 键,康 涛,刘 莉,吴华夏

(安徽华东光电技术研究所 现代成像省重点实验室,安徽 芜湖 241002, E-mail:samhust@gmail.com)

摘 要: 按照空间特殊环境的要求,重点设计了液晶显示器的多功能光学窗口、液晶屏加热器、白光 LED 背光源和光学膜组等关键部件,达到了空间用液晶显示器表面减反射、电磁屏蔽、低温下启动、背光亮度较高和均匀性好、显示效果理想、高可靠性等具体技术要求。

关 键 词: 加固液晶显示器;减反射;电磁屏蔽;加热器;背光

中图分类号: TN141.9 **文献标识码:** A

1 引 言

神五、神六及神七的成功发射与返回标志着我国载人航天事业进入崭新的阶段,空间实验室的建设和航天飞机的研制将是我国航天事业的重要目标。虽然国内载人航天事业取得了举世瞩目的成就,但其中为宇航员提供视觉信息的平板显示器却一直依赖进口。为此,开展空间用液晶显示器的研究以打破国外的禁运封锁,解决载人航天装备的急需,对我国载人航天事业显示系统的发展具有重大意义^[1-3]。

空间用加固 TFT 液晶显示器主要针对空间特殊环境而设计,为载人飞船和目标飞行器的仪表与照明分系统提供配套,作为显示终端进行文字、图标、图形、图像信号的显示及图形-图像信号的合成显示。加固型液晶显示器应用广泛,不仅可以在航天各领域作为计算机显示终端、仪表显示器和视频监视器,而且可以作为空间实验室的显示设备和航天飞机的多功能显示器(MFD)。

国外对空间用加固型液晶显示器的研究可以追溯到 20 世纪 90 年代。2000 年 5 月,亚特兰蒂斯号航天飞机使用了一种新型驾驶舱,这种波音 777 式玻璃驾驶舱称为多功能显示分系统(MEDS),由霍尼韦尔空间系统公司研制。除亚特兰蒂斯号外,哥伦比亚号、发现号和奋进号航天飞机轨道器也将陆续更换成这种玻璃驾驶舱。MEDS 由 11 台液晶 MFD 组成以取代过时的机电式座舱显示器,包括阴极射线管屏幕、仪表和仪

器等。该系统使机组人员可以通过机上信息管理系统的 2D 和 3D 彩色图形和图像显示很容易地获取重要信息。

目前国内对空间液晶显示器的研制尚处于起步阶段,远不能满足航天领域对该系列产品的需求。国内几家从事军用加固液晶显示产品研制的单位现已开始了对空间液晶显示新产品的研发,但基本都停留在方案研制阶段或样机研制阶段,还无法满足正式装机使用要求。

本文结合 38 cm(15 in) 空间用加固 TFT 液晶显示器的研制项目,重点设计了多功能光学窗口、液晶屏加热器、LED 背光源和光学膜组等组件,对其性能及关键技术进行了研究。

2 空间用液晶显示器的分析设计

2.1 多功能光学窗口设计与分析

空间用液晶显示器要求在屏幕前设置一个多功能光学窗口,其主要功能是:减小环境光反射;实现电磁屏蔽;保护液晶屏;防止液晶屏破碎后残渣飞溅。

现在通常采用的多功能光学窗口材料有复合层压玻璃和丙烯酸树脂(PMMA)两种。

复合层压玻璃^[4]是将一块镀有减反射膜的玻璃和一块导电玻璃通过高透过率胶片材料在高温、高压环境下粘接复合,复合后的双层玻璃具有较好的强度和安全性,其设计关键是减反射设计和电磁屏蔽设计。

丙烯酸树脂(PMMA)滤光片也是普遍采用

的一种多功能光学窗口材料,它不仅具有耐候性好、抗老化性强、无毒无害、硬度大等优点,而且相比玻璃材料还具有重量轻、抗冲击强度大、即使破裂也不出现粉碎性碎片等特点。但是由于 PMMA 在温度较高时容易变形,所以在 PMMA 上镀制 ITO 膜时,其衬底温度远低于玻璃,所制得的 ITO 薄膜存在光透过率低和容易脱落的缺点。表 1 是两种材料的优缺点对比。

表 1 复合层压玻璃与 PMMA 窗口的主要指标对比
Table 1 Comparison of key parameters between composite laminated glass and PMMA

名称	PMMA	复合层压玻璃
重量	较轻	较重
厚度	2 mm	3.5 mm 以上
透过率	90%	80%
强度	一般	好
硬度	一般	好
镀膜工艺	复杂	简单
安全性	好	好

由表 1 可见两者各具优缺点,但出于可靠性的考虑,复合层压玻璃更适合作为空间用液晶显示器的多功能光学窗口。

2.1.1 减反射设计与分析

减小表面反射光的影响以提高显示对比度,通常有两种方法^[5]:减反和防眩。减反处理是在玻璃表面通过镀膜的方式镀制多层宽带减反射薄膜,使之在整个可见光谱范围内都具有较小的反射率,最大反射率以达到 0.5% 以下为好;防眩设计是在玻璃表面形成一层凹凸不平的具有“蜂眼”效应的“多孔”层,即防眩涂层,由于其凹凸不平的表面造成光线漫反射,使反射率下降。

在空间应用环境中,影响显示器显示效果的因素主要是环境光的辐照。减反膜方案不仅可以有效降低反射率,而且可以增加光的透过率。防眩涂层玻璃的制备方法通常是使用 HF 酸和 NaOH 溶液直接对玻璃基板进行化学腐蚀,但这种方法经常会造成玻璃基板透光性严重降低,造成显示画面模糊。因此在两种方案中以减反射膜方案为佳。

对比度定义如下:

$$K = \frac{B_{\max} + B_0}{B_{\min} + B_0} \tag{1}$$

其中: $B_{\max}$ 为图像最亮处器件本身的亮度; $B_{\min}$ 为图像最暗处器件本身的亮度; B_0 为环境光反射形成的亮度。

图 1 为减反射滤光片示意图。其中 R_1 为滤光片的反射率,小于 0.5%; R_2 为液晶屏表面反射率,大于 4%; I_0 为环境光光强。环境光 I_0 的频谱很宽,跨越全部可见光范围。为了提高对比度,需设法减小 $R_1 I_0$,即减小光学窗口表面反射率 $R(\lambda)$ 。显然可见,不用减反射滤光片时,环境光亮度为 $B_0 = I_0 \times R_2$;使用光学窗口后, $B'_0 = I'_1 + I'_2$, $B'_0 \ll B_0$ 。光学窗口的基片材料一般选用浮法玻璃,其本身反射率为 4% ~ 5%,而它的折射率为 1.52 左右,若在其表面镀上一层薄膜,当材料的折射率小于基片折射率且光程满足 $nd = \lambda_0/4$ 时,对于波长为 λ_0 (参考波长)附近的光有很好的减反射效果。

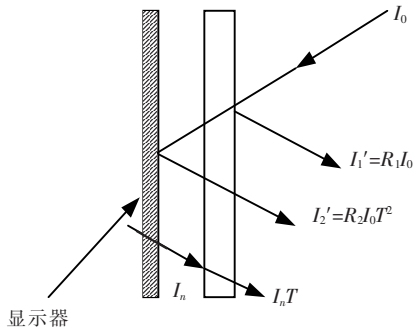


图 1 减反射滤光片示意图
Fig. 1 Schematic diagram of anti-reflection filter

然而对于波长明显偏离 λ_0 的环境光,薄膜对其反射仍然较大,甚至有些波段的反射率反而有所增加,另外还破坏了色度平衡,所以需要在滤光片表面蒸镀多层减反射薄膜。通过交替镀制低/高折射率膜,可以在较宽的波谱范围内,使光反射率差不多有同等的下降,通过适当的计算可以获得较佳的层数及每层选用的材料。设计薄膜时根据光学薄膜特征矩阵进行计算:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \prod_{i=1}^K \begin{bmatrix} \cos \delta_i & i \sin \delta_i / n_i \\ i n_i \sin \delta_i & \cos \delta_i \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \delta_2 & i \sin \delta_2 / n_2 \\ i n_2 \sin \delta_2 & \cos \delta_2 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} \cos \delta_k & i \sin \delta_k / n_k \\ i n_k \sin \delta_k & \cos \delta_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ n_s \end{bmatrix}$$

有效导纳 $Y = \frac{C}{B}$, 反射率 $R = \left(\frac{1-Y}{1+Y} \right)^2$, $\delta_i = \frac{2\pi}{\lambda} n_i d_i$ 。式中: n_s 为基片折射率; n_i 为第 i 层薄膜

的折射率; d_i 为第 i 层薄膜的几何厚度。

所设计的减反射薄膜在宽频谱范围(整个可见光波段)都具有减反射效果。考虑到膜层的机械性能,采用三层膜结构,第一层薄膜折射率为 1.70;第二层(即中间层)薄膜折射率为 2.05~2.10;第三层(即最外层)薄膜的折射率选择小于 1.50,光程厚度可选择为 $\lambda_0/4-\lambda_0/2-\lambda_0/4(\lambda_0=545\text{ nm})$ 。

2.1.2 电磁屏蔽设计与分析

由于显示器通常工作于电场、磁场较强的环境中,还会受到外界强电磁波的干扰,所以为保证显示器在此环境下能正常工作,必须在液晶屏表面进行电磁屏蔽处理^[6]。

电磁屏蔽的一种方法是在窗口内部加金属丝网,但这样会使窗口的光透过率大幅降低,不仅降低了显示器亮度,而且金属丝网容易产生水波纹,严重影响到视觉效果。因此,现在一般通过在高透过率玻璃上镀制 ITO 导电膜^[7]来解决电磁屏蔽问题。

根据各膜层的光学参数制定屏蔽膜电阻的范围才能保证透过率和屏蔽效果。通过膜层的厚度与光学参数的相互关系和屏蔽效果得出:在 ITO 膜的方块电阻为 10~20 $\Omega/\square$ 时可以保证多功能光学窗口的屏蔽性能和光学特性达到最佳平衡。

2.2 液晶屏加热器设计与分析

当液晶屏工作于较低温度环境中时,液晶的粘滞系数增加,电光效应减弱。此时具体表现为:整体亮度下降;对比度快速减小;色彩变淡;图像响应时间加长。空间用液晶显示器的工作温度范围要求低温达到-40 $^{\circ}\text{C}$,远超过了液晶显示器的正常工作范围,所以必须采取加热措施来保证其在低温下能够正常工作。

2.2.1 加热膜设计与分析

本文设计了一种透明的玻璃平板加热器,当液晶屏处于低温时,电流通过加热器表面膜层产生焦耳热而传到玻璃内的液晶,使之能正常工作。

对平板加热器要求是:加热功率要低,光透过率要高,但这两者之间存在着矛盾。首先,要想在较短的时间内让液晶屏正常工作,必须提供尽可能大的热量,而输入电压已被限制,因此只能通过降低薄膜电阻提高输入功率;然而,为了降低电阻需要增加膜厚,而膜厚的增加则会降低光的透过率。

选择合适的镀膜材料和确定最佳膜厚是解决

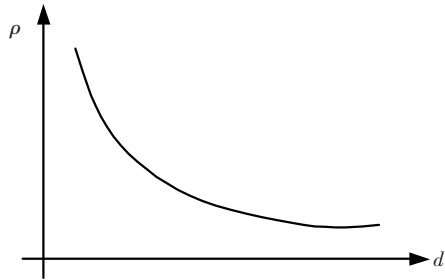


图 2 膜厚与电阻率的关系

Fig. 2 Relationship between film thickness and resistivity

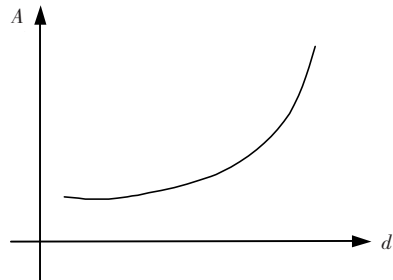


图 3 膜厚与光吸收率的关系

Fig. 3 Relationship between film thickness and light absorption rate

矛盾的关键。在薄膜材料的选择过程中,曾经实验了多种方案。如 ($\text{SnO}_2:\text{Sb}_2\text{O}_5$)、($\text{ZnO}:\text{Al}_2\text{O}_3$)、($\text{SnO}_2:\text{In}_2\text{O}_3$)、(Cd_2SnO_4)。而以 ($\text{SnO}_2:\text{In}_2\text{O}_3$) 组合得到的电阻率最小。当 SnO_2 和 In_2O_3 单独存在时电阻率都很大,只有当它们以恰当的比例混合时,才能产生较小的电阻率。

目前已制作出了满足要求的加热器,光透过率在 84% 以上,方块电阻在 10~15 $\Omega/\square$ 。电极采用导电银浆制作,强度高、连接可靠。

2.2.2 加热器的固定

加热器和液晶屏的装配有两种方式:插入式和粘接式。

插入式结构是利用外壳的盒定位和固定加热器,这样容易更换插片,但会增加模块厚度,抗振动与冲击性稍差,增加了加固难度。与插入式相比,粘接式结构具有以下几个优点:连结 LCD 屏比较紧凑;横向几何尺寸较小;粘接面不易产生局部应力集中,耐疲劳强度高;不需增加加工设备,简单易行;减轻结构重量,能做到轻量化;具有密封、绝缘、防潮、减振等多种功能。

对透过率而言,插入式有一装配间隙充满空气介质,这样在连结块间就存在着两个光折射界

面,光线在空气隙里,透过光 $T=1-A-R$ 。采用粘接式,选用折射率近似玻璃 $n=1.5$ 左右的粘接胶粘接成一体,胶界面因两边介质折射率相近光线入射可视为无反射即 $R=0$,透过光 $T=1-A$ 。可见粘接式的透光性比插入式要高。但粘接式的缺点是粘接间隙小(一般几十微米),若粘接不好则很难用溶剂溶解中间的粘合剂,因此要求必须一次性粘接成功。

粘接时,以导电面作为粘接面,这样导电膜层可以得到保护,不易受外界环境的影响。为了减少亮度损失,粘接胶的光透过率要求必须很高,另外还要满足以下条件:

- (1)光学胶的折射率与两边被粘接的基体材料相当;
- (2)为了抗振动、耐冲击,粘接胶要有较高的粘接强度;
- (3)为适应航天环境,粘接胶在 $-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内性能稳定且热膨胀系数(伸缩系数)与基片相匹配。

考虑显示器的实际使用环境,可以认为粘接式更适合空间液晶显示器的应用。液晶盒的厚度一般在 1.1 mm 左右,采用光学粘接的方式可将加热器与之紧密结合成一个整体,使液晶盒的强度增加 2 倍以上,且在意外情况下,加热器或液晶盒碎裂后能有效减少玻璃残渣的出现。

2.3 LED 背光源设计与分析

背光源部件由光学膜组和 LED 背光组成^[8]。光学膜组主要由反射膜、漫射膜、增亮膜等组成,主要作用是提高液晶屏的亮度和均匀性。LED 背光作为液晶屏的照明光源,通过直流低压驱动,具有环境适应性强($-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境下可正常工作,无需加热)、可靠性高和安全性好等优点。

2.3.1 光学膜组的设计与分析

由于受功耗限制和 LED 灯特性的影响,背光源本身亮度不是很高,再加上液晶屏透过率较低,只有 $3\%\sim5\%$ 左右,因此需要采用反射膜、漫射膜、增亮膜等膜系的组合来提高显示亮度。

通过分析液晶显示系统的光传递过程可知,在背光源亮度不变的前提下,要想取得较高亮度必须解决好光的收集与漫反、光的准直和光的回收等课题。

光源发出的光有很大一部分发射到背光源的底部和四壁,如能高效反射这部份光,使之可以充

分利用,则可有效提高亮度。本文采用高反射率的反射膜材料,反射率高达 97% ,贴在背光源底部和侧面,使背光灯发出的光可以被充分利用。

当光通过液晶显示屏下层偏光片时,有 50% 的光被白白吸收浪费掉。针对以上现象,采用一种反射偏振膜来提高背光进入液晶屏偏振光的总量。其原理是:将光线不再准直到垂直于液晶屏的方向上,而是利用光学元件的反射把它循环到垂直的偏振元件中,使原本被吸收的 50% 偏振光重复利用,进入到液晶屏的偏振光总量增加。

一个完整的背光光学系统并不是以上材料的简单组合。通过研究各光学膜之间的光学参数的最佳匹配和以往的测试数据,最终确定了如图 4 所示的光学膜系组合。

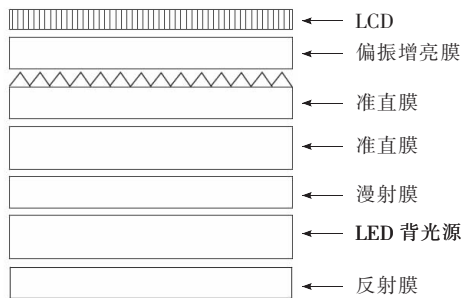


图 4 光学膜组示意图
Fig. 4 Optical films group diagram

2.3.2 LED 背光设计与分析

理想的红绿蓝三色光的波长分别是 $620, 525, 470\text{ nm}$ 。为了提高效率,LED 背光源有静态照明 LED 背光源、反馈型 LED 背光源和高亮度直接型 LED 背光源几种设计。

(1)静态照明 LED 背光源^[9]

其主要原理是使 LCD 的每个子像素只通过与其相应的色元件照明,从而省略滤色器,提高光效。该背光源的优点是光效高、功耗低;缺点是光学设计复杂,不易加固,力学环境适应性较差,可靠性较低。

(2)反馈式 LED 背光源

反馈式 LED 背光源系统由 4 个主要的功能模块组成:具有滤色层的传感器、反馈控制器、脉宽调制(PWM)LED 驱动器以及红绿蓝 LuxconTM型 LED 光源阵列元件。这种光源具有色域宽、色度可调及环保的优点,其缺点是电路控制复杂,所用控制芯片最高只有工业级,且整个光效较低,功耗较大。

(3)高亮度直接型 LED 背光源

此类背光源是一种边光式背光源,具有沿其光学轴作 360°发射、较薄的镜片覆盖较大的面积和利用简单的结构进行混色的特点。

用于液晶显示器背光的高亮度发光二极管有两类:一类是白光二极管,其发光机理是通过半导体材料发射蓝光,然后由部分蓝光激发荧光物质,发出另外的色光,合成白光;另一类是直接的红绿蓝三色二极管分别发光,通过光学结构混合成为白光。两种方式各有优缺点,白光二极管的特点是光学结构和控制电路简单,但是光谱范围小,演色性稍差;RGB 三色二极管合成白光的方式,其光学结构和驱动控制电路相对复杂,但色彩表现能力强。考虑到系统的可靠性要求,本文选择白光二极管制作 LCD 的背光源。

背光源的光路设计采用侧面用 LED 灯对导光板进行照明(EBS)的方式^[10],由导光板对光进行均匀化处理。为了使光均匀分布,导光板的厚度设计为 6 mm,采用液晶盒两长边对称布置 LED 光源的方式。具体的光源布置如图 5 所示。LED 发出的光首先经过 90°反光镜反射进入混光板,在混光板中光场均匀分布,再通过 180°反光镜进入导光板,以均匀照亮液晶盒。

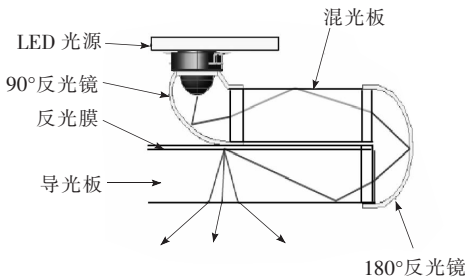


图 5 EBS 光路设计示意图

Fig. 5 Light route design diagram

至于准确的 LED 光源的数量,则需要根据液晶显示器的亮度和光线通过部件的光学特性来确定。本文根据显示器的设计亮度、光学理论及各部件的试验结果,采用反向追踪的方法,得出了最终需要的光通量,由此确定了要选用的 LED 灯的光电参数。

若显示器的设计亮度为 200 cd/m²,光线要通过的部件为:光学窗口、液晶屏、液晶屏加热器、光学膜组、导光板、反射腔、混光板、集光腔。以光学窗口的透过率为 70%计算,则在光学窗口前的

亮度应为 200 cd/m² ÷ 70% = 285.7 cd/m²;同样液晶屏及液晶屏加热器的透过率分别为 7.5%与 84%,则光学膜组表面出射的亮度要求为:

$$285.7 \text{ cd/m}^2 \div 7.5\% \div 84\% = 4\,534.9 \text{ cd/m}^2$$

由于光学膜组是由多个部件组合而成的,既有扩散膜又有亮度增强膜,所以对它的研究可分为散射效果分析与增亮效果分析两部分。整个光学膜组可以把轴线方向的亮度提高 1.6 倍。由于散射膜表面的散射效果为朗伯散射,半亮度的角度为 60°,这样积分可得光强度与光通量的关系为:

$$\text{光强度(cd)} = \text{光通量(lm)} / \pi(\text{Sr})(\text{球面度,立体角单位})$$

这样考虑散射角度后,追踪到导光板时将转换到光通量的概念。根据光学理论,光通量与亮度的关系为:

$$1 \text{ lm} = 1 \text{ cd/m}^2 \times 1 \text{ Sr} \times 1 \text{ m}^2$$

液晶屏的有效显示区为:

$$245.76 \text{ mm} \times 184.32 \text{ mm} = 45\,298.5 \text{ mm}^2 = 0.0453 \text{ m}^2$$

则自导光板要出射的光通量为:

$$4534.9 \text{ cd/m}^2 \div 1.6 \times 0.0453 \text{ m}^2 \times \pi \text{ Sr} = 403 \text{ lm}$$

导光板的效率约为 70%,则反射腔内的光通量需为 575.7 lm。同样,反射腔的效率为 93%,混光板的效率为 90%,集光腔的效率为 85%,则最终需要的光源的光通量为:

$$575.7 \text{ lm} \div 93\% \div 90\% \div 85\% = 809 \text{ lm}$$

根据对光通量的要求,设计中选用美国流明公司的 3 W 高亮度 LED 灯,在额定工作电流下,每颗灯所辐射出的光通量为 80 lm。本文采用降额使用的方法提高 LED 灯的稳定性及寿命,每颗灯为半额使用,辐射出的光通量约为 40 lm,这样 20 颗 LED 灯总的辐射光通量约为 800 lm,可以满足亮度要求。

3 结 论

按照空间用液晶显示器的特殊环境要求,设计了空间用液晶显示器中多功能光学窗口、液晶屏加热器、白光 LED 背光源和光学膜组等关键部件。通过添加复合层压窗口,不仅达到了减反射和电磁屏蔽的目的,而且还解决了液晶屏碎裂后残渣飞溅问题;通过粘接屏加热器使液晶屏可以在低温下启动并正常工作;所设计的 LED 背光系统在功耗一定的条件下,使显示器的显示亮度和显示效果得到了有效的提高。

参 考 文 献:

[1] 李晓莲,任国度. 高温显示液晶的合成 [J]. 液晶与显示,1999, 14(1):1-5.
[2] 邵喜斌. 液晶显示技术的最新进展 [J]. 液晶与显示,2000,15(3):163-170.
[3] 黄锡珉. 平板显示技术的发展 [J]. 液晶与显示,2002,17(5):317-322.
[4] 胡跃辉, 杨军, 吕国强, 等. 多功能一体化光学复合窗口的研制 [J]. 中国科技信息,2007,12:290-291.
[5] Sheraw C D,Nichols J A. An organic thin film transistor backplane for flexible liquid crystal displays[C]//*Device Research Conference*, 2000. *Conference Digest*. 58th DRC,Colorado,USA:University of Denver,2000:107-108.
[6] Salvatore Celozzi, Rodolfo Araneo, Giampiero Lovat. Electromagnetic Shielding [M]. New York: Wiley-IEEE Press,2008.
[7] 马颖,吕庆莉,张方辉,等. 锡掺杂对 ITO 膜方阻和结构的影响 [J]. 液晶与显示,2006,21(5):460-465.
[8] Perduijn A T. Light output feedback solution RGB LED backlight applications [C]//*SID 03 Digest*, Baltimore, USA;SID,2003:1254-1257.
[9] 季旭东. 新型 LCD 用 LED 背光源 [J]. 照明工程学报,2004,15(2):23-27.
[10] 王文根,李瑛,邵明,等. 用于 TFT-LCD 的大功率 LED 侧式背光系统 [J]. 液晶与显示,2006,21(5):533-539.

Key Techniques for Liquid Crystal Display in Space

DONG Dai, SHEN Wei, ZHANG Tao, SHEN Jian, KANG Tao, LIU Li,WU Hua-xia
(Key Laboratory of Modern Imaging and Display Technology of Anhui Province,
Anhui Hua Dong Photoelectric Technology Institute,Wuhu 241002,China,E-mail:samhust@gmail.com)

Abstract

According to the requirement of special space environment, the key techniques for liquid crystal display in space was studied, the multifunction optical window, liquid crystal display (LCD) heater, white LED backlight and optical film assembly for LCD were designed and analyzed. The detailed technical requirements of surface anti-reflectance, electromagnetic shielding, low temperature startup, high luminance backlight, ideal display effect and high reliability for space LCD were achieved.

Key words: ruggedized liquid crystal display; anti-reflectance; electromagnetic shielding; heater; back-light

作者简介:董戴(1966—),男,浙江嘉兴人,副总工程师,副研究员,主要研究方向为液晶显示等。