

第一章 概 述

军用飞机座舱显示与控制系统（以下简称座舱显控系统）是驾驶员与飞机之间交换信息的接口，显示系统向驾驶员提供飞机从起飞、导航、搜索、跟踪、瞄准、攻击和着陆全过程所需要的各种信息，如飞机的姿态、飞行高度、飞行状态等参数，以及机外的战场态势；驾驶员通过控制器和显示信息完成正常飞行、战斗、侦察等任务。可见，座舱显控系统的先进程度直接影响飞机作战任务的完成质量。随着科技的不断发展、飞机性能的逐渐提高，座舱显控系统在 20 世纪 60 年代由机电伺服仪表过渡到电子显示器，70 年代后期开始向综合电子显示系统发展。军用飞机座舱显控系统正向着综合化、数字化、自动化、智能化、高精度、高效能、高可靠性方向发展，从而不断减轻驾驶员的负担，有效提高飞机的作战效能。

第一节 显示技术基础

根据信息显示年会 1963 年发表的文献定义：信息显示是为了将特定的信息向人们展示而使用的全部方法和手段。显示技术则是将反映客观外界事物的信息（光学的、电学的、声学的、化学的等）经过处理，以适当形式（主要有图形、图像、数码、字符）加以显示，供人观看、分析、利用的一种技术。广义地讲，显示技术包括各种原始的机械显示技术，如机械式钟表是一种时间显示装置。而在当前的信息工程学领域中，将显示技术限定在基于电子手段产生的视觉效果上，即根据视觉可识别的亮度、颜色，将信息内容以电信号的形式传达给眼睛而产生视觉效果，称为电子显示。

一、显示技术的发展史

据统计，1960—1990 年信息的平均年增长率为 20%，预计到 2020 年将达到每 2.5 个月翻一番的惊人速度。反映客观外界事物的信息有光学的、电学的、声学的、化学的等各种表现形式，这些信息经由人们的各种感觉器官来获得，其中视觉占 60%，听觉占 20%，触觉占 15%，味觉占 3%，嗅觉占 2%，可见，近三分之二的信息是通过眼睛获得的。信息可以以文字、语言、图像等形式表达出来，其中，图像的传送速度最快、信息量最大，所以图像显示成为信息显示中最重要的方式。

进入 20 世纪以来，作为人机联系和信息展示的窗口，显示技术已应用于娱乐、工业、军事、交通、教育、航空航天、卫星遥感和医疗等各个方面，显示产业已经成为电子信息工业的一大支柱产业。在我国，显示技术及相关产业的产品占信息产业总

产值的 45% 左右。

20 世纪, 图像显示器件中阴极射线管 (CRT) 占了绝对统治地位, 如电视机、显示器等绝大多数都采用 CRT; 与此同时, 平板显示器也在飞速发展, 特别是液晶显示器的质量大幅度提高, 价格又持续下降, 不但在中、小屏幕显示中代替了 CRT, 而且快速进入计算机显示器领域。就世界范围而言, 以液晶显示为主的平板显示器的产值, 在近年内将超过 CRT 显示器的产值。人们预言, 21 世纪将是平板显示的时代。

按照显示原理分类, 电子显示主要包括阴极射线管显示、液晶显示、等离子体显示板显示、发光二极管显示、有机发光二极管显示、电致发光显示、真空荧光管显示、场发射显示等。各种显示器件特性的比较如表 1-1 所示。

显示器件的发展和实用化过程如下。

(一) 早期显示器 (1970 年以前)

最早使用的电子式信息显示器是 1897 年由德国布劳恩 (Braun) 发明的阴极射线管 (CRT), 也称为布劳恩管, 最初只用于观测波形及相应的测量设备中。1940 年前后的第二次世界大战中, 出于军事需要, CRT 应用于雷达显示, 从而获得了长足的发展。

1950 年, 美国 RCA 公司发明了荫罩式彩色 CRT。CRT 应用于彩色电视机, 从而使彩色电视飞速发展。但是早期的彩色电视机亮度低, 只能在暗的环境中观看。后来, 新荧光粉的使用、黑底荧光屏的开发等使得彩色电视机的亮度提高了 10 倍, 外光在屏上的反射降低了 1 倍, 这样人们在明亮的室内环境中也能愉快地观看彩色电视节目了。

随着荧光材料、荧光屏结构、遮蔽屏、电子枪及偏转线圈等彩色 CRT 主要技术的改进和制造技术的进步, 实现了彩色 CRT 极佳的性价比。但是由于彩色 CRT 在正常工作时必须有电子枪和偏转线圈, 使得彩色 CRT 的体积和质量均较大。因此薄形的电视机是电视技术人员追求的目标, 这是产生平板显示器的原动力。

(二) 显示技术与半导体、计算机技术共同发展 (1970—1990 年)

1. 视频显示终端 (VDT) 成为人机接口的主流

美国从 20 世纪 50 年代开始开发采用 CRT 的计算机显示系统, 最早投入使用的是 1957 年的 SAGE 对空防卫系统, 其后的开发研究多集中在军事领域。在此期间开发了使用 CRT 和光笔实现人机对话功能等重要技术, 并在 1966 年发表了大量关于图形显示方面的论文。计算机技术得到了飞速发展, 作为人机接口的数据显示技术逐渐地浮出水面。早期计算机主要采用绘图仪、打印机这类硬拷贝形式进行信息显示与记录; 随着边看输出数据或图形、边给计算机发指令这类操作的普遍化, 视频显示终端 (Visual Display Terminal, VDT) 从 1970 年开始迅速得到普及。VDT 使用的 CRT 不同于用于仪器、电视机中的 CRT, 称为用于显示的 CRT (显示管)。其中, 用于显示的彩色 CRT 称为彩色显示管 (Color Display Tube, CDT), 而用于彩色电视机的彩色 CRT 称为彩色显像管 (Color Picture Tube, CPT)。

表 1-1 各种电子显示器件的显示特性

显示特性	非主动发光型		主动发光型							
	LCD		PDP		LED	OLED	ELD	VFD	FED	CRT
	PM 型	AM 型	AC 型	DC 型						
工作电压 /V	AC 2 ~ 5		AC 90 ~ 150	DC 180 ~ 250	DC 2 ~ 5	DC 3 ~ 15	AC 100 ~ 200	DC 10 ~ 40	DC 500 ~ 10 ⁴	DC (2 ~ 3) × 10 ³
单位面积 消耗电流 / (1/cm ²)	数微安		数毫安		数十毫安	十几毫安	数毫安	数毫安	数十微安	约 1 微安
对比度	10 ~ 25	50 ~ 80	20 ~ 50		约 40	约 40	约 40	约 50	约 100	约 100
响应时间	30 ~ 200 ms	20 ~ 60 ms	2 ~ 20 μs		约 1 μs	2 ~ 3 μs	5 ~ 50 μs	约 10 μs	约 1 μs	约 1 μs
亮度 / (cd/m ²)	0		250 ~ 400		170 ~ 1600	10 ² ~ 10 ³	70 ~ 200	180 ~ 1500	300	140 ~ 500
显示色	黑色 多色 ~ 全色		红橙、 多色 ~ 全色		红、橙、 蓝、绿	红、绿、蓝 全色	黄橙、绿、 红、(蓝)	蓝绿、红、 橙、绿	黑白 全色	黑白 多色 ~ 全色
存储功能	× (○)		○		×	×	△	×	×	×
工作寿命	○		○		○	△	○	○	△	○

注：○—不存在问题，容易实现；△—存在一些问题，可以实现；×—存在难以解决的问题，不能实现；PM 型—无源矩阵型；AM 型—有源矩阵型。

早期的显示管大多采用单色显示管,也生产了显示白色和欧洲人比较喜欢的琥珀色的显示管,这些均是背景为黑色、文字为带颜色的显示,称为负显示。20世纪80年代中期开始使用白色背景、黑色文字的正显示(也称反转显示)。VDT的显示面的外光强度比用于电视机的要高,因此,为降低显示面的扩展光反射率、确保对比度,使用了透光率为30%~50%的深色前置玻璃。此外,还进行相应的表面粗糙化和非眩光反射表面处理以减轻表面的镜面反射。

随着计算机存储器容量的增大,需要显示高清晰度图像。为此,CRT也发展成为高分辨率的彩色CRT。但是随着办公自动化(OA)的普及,CRT的X射线辐射和电磁辐射问题日益受到人们的重视,例如,1967年美国GE公司生产的彩色电视机曾发生过放射泄漏的问题。之后开始对此开展了集中的调查、研讨和改进,20世纪70年代前期开始使用大量吸收X射线的玻璃阀。虽然CRT采用了能将X射线衰减到不危害人类健康的地步,但是人们心中总是心存疑惑。

2. 平板显示器的实用化

1970年以后,随着超大规模集成电路(VLSI)的发展,与此相适应的小型数据显示器如小型计算器、电子手表等的需求量激增,促使真空荧光显示管(VFD)、发光二极管(LED)、液晶显示器(LCD)等平板显示技术更加实用化。而台式电子计算机对家庭的渗透,正促使家庭电气化向着“个人电子化”迈进。“个人电子化”必须是袖珍式,即耗电越小越好。作为显示器件,还希望电路结构(包括驱动电路和外围电路)尽可能简单,功耗小并能实现集成化。液晶能与低电压、低功耗的互补MOS(CMOS)相匹配。液晶显示器在小型显示器中战胜了VFD、LED,占据了市场主要份额,不但用于计算器和手表,还扩展到AV设备、汽车仪表、股票行情显示屏等多种场合。但是VFD与LED是主动发光型,仍有各自的市场位置。

这段时期平板显示器正处于初生期,未能进入电视机与VDT领域,CRT仍处于雄霸显示器市场的地位。

但是LCD借助集成电路技术,发展出非晶硅薄膜晶体管(TFT)显示器,即有源矩阵液晶显示器(AM-LCD),使得LCD能显示出大信息容量的图像。但是直到1990年左右,带AM-LCD的便携式计算机仍是一种昂贵的办公工具。

20世纪70年代初进行了等离子体显示板(PDP)的开发,目标直指计算机终端,并于80年代应用到银行终端、股票价格显示等场合。

(三) 平板显示技术进入突飞猛进的发展阶段

1. LCD 迅速发展

20世纪90年代前期,各公司相继推出10 in^① TN型AM-LCD,并努力改进和提高生产工艺,使得TFT的成品率开始从百分之几逐渐地提高,因此成本下降,LCD笔记本电脑的使用面拓宽,但是尺寸仍限于10 in左右。

笔记本电脑对视角无大的要求,但是LCD要想进入电视机领域必须解决LCD视角小

^① 1 in = 25.4 mm。

的固有缺点。因此,设计人员开发了一系列增加 LCD 视角的新方法、新工艺,如平面控制模式 (IPS - mode)、光学补偿弯曲排列模式 (OCB - mode)、垂直取向模式 (VA - mode) 等,使 LCD 的水平视角扩展到 140° 以上,基本解决了视角不足的问题。

LCD 的另一个弱点是响应速度低,不适用于视频图像显示。为了使 LCD 能进入电视机领域,一方面将液晶层做薄;另一方面对液晶材料进行了深入研究,开发出一系列适合视频显示的材料。LCD 在材料、工艺和结构上的进步,使 LCD 在显示视频图像时,只要不是快速变化的动态图像,已没有大的问题。

至此,妨碍 LCD 进入电视机领域的两大问题 (视角小和响应速度低),在 20 世纪末基本获得了解决。同时, TFT 在大面积生产工艺上的日渐成熟,也打破了过去认为 LCD 不适宜制作大屏幕的限制。于是 LCD 开始了向 30 in、40 in,甚至更大屏尺寸 (如 100 in) 的电视机进军。

至 21 世纪初, LCD 在 VDT 领域大规模地取代了 CRT; 在高清晰度 40 in 电视机领域取得了与 PDP 并驾齐驱的地位。

2. 全彩色 PDP 的产业化

在 LCD 尚未解决其视角小、响应慢的弱点以前,一致认为 PDP 是唯一适合 40 in 以上高清晰度显示的显示器。但是 20 世纪 80 年代 PDP 在单色屏上取得重大进展后,在 90 年代初全彩色化的道路上碰到很大困难,而寿命和发光效率也困扰着全彩色 PDP 的实际应用,这些问题到 90 年代末都得到基本解决。为了扩大应用,首要的问题是把生产成本降低。全彩色 PDP 已实现应用,下一步的发展集中在进一步提高流明效力和在大生产中如何降低成本上。

3. 全彩色 LED 大显示屏的实现

LED 室外显示屏早已矗立在大街上和公共场所, LED 也从发光效率较低发展到超高亮度。但是直到 20 世纪 80 年代末,由于蓝光 LED 发光效力极低,始终未能实用化,因此各种室内、外 LED 显示屏都缺乏蓝光,构不成全彩色。

到了 1993 年,德岛日亚化学工业公司的中村等人研制出了采用 InGaN 系双异质结构的蓝光发光二极管,其发光强度达 1 cd,为全彩色 LED 显示屏奠定了基础。到了 20 世纪 90 年代后期,蓝光 LED 大规模投入生产,价格也迅速下降。现在无论在室内还是室外,都已到处可见全彩色 LED 显示屏。

(四) 新平板显示器的出现

采用各种显示技术的显示屏均各有优缺点,如 CRT 体积大; LCD 不仅是被动发光,且对环境温度敏感;而 LED、VFD 虽然是主动发光,但是分辨率低。因此,迫切希望有新的平板显示器件能够不断出现。

1. 有机发光二极管显示 (OLED)

LED 属于无机发光二极管,基本上采用半导体制造工艺,在一个圆片上制出众多小芯片,经分割后通过后工序制成单芯片或多芯片的 LED,工艺复杂,分辨力也提高不上去。

1987 年美国柯达公司 C. W. Tang 制备成功超薄双层结构小分子有机发光二极管

结构,从而引发了 OLED 的研究热潮;1990 年英国剑桥大学的 Friend 制备成功共轭高分子 OLED 柔软显示屏。OLED 所用材料是有机质,可以用分子设计合成各种所需材料。例如,发蓝光的 OLED 的制造就比无机 LED 容易得多;OLED 又是连续薄膜结构,所以分辨力不成问题。小分子 OLED 制造工艺主要是镀膜,高分子 OLED 制造工艺主要是旋涂和印制,特别适合大规模生产。

OLED 已在小至手机彩屏,大至 40 in 的彩色电视机中使用或制成样品,是目前世界范围内平板显示技术中的研究热门,在各类国际会议中,有关 OLED 的文章数量可与 LCD、PDP 相比。OLED 如果进一步解决了寿命问题,估计将来会在中小屏幕显示领域占有不少份额。

2. 场致发射显示器 (FED)

从理论上讲,FED 具有 CRT 和 LCD 的优点,即 FED 既是平板显示器件,又可利用电子束轰击荧光粉主动发光。1968 年 Spindt 提出钨锥场致发射阴极,形成 Spindt 阴极概念;1979 年 Spindt 阴极寿命超过 25 000 h (12 A/cm^2 工作电流);1986 年首次报告矩阵选址平板单色场致发射显示屏。但是 Spindt 阴极型 FED 生产成本太高,目前只停留在小屏幕显示器上,主要用于军事领域,未能进入大屏幕消费领域。目前,被大家看好的是碳纳米管阴极显示器,已有 40 in 样管,但还需解决发光均匀性的问题。

从 20 世纪 90 年代至今,还出现了不少新型场致发射显示器,其中以表面传导发射显示 (SED) 的性能最为突出,已于 2007 年投入大生产。按发表的性能数据看,产品为 50 in 电视机用显示屏的综合指标优于大屏幕显示用 PDP 和 LCD,有可能成为 PDP 和 LCD 电视机的有力竞争者。

3. 机电致发光显示板 (EL)

电致发光 (Electro Luminescence, EL) 是指对物质施加电场而发光的现象。EL 分薄膜型和粉末型两类,每一类又分为直流和交流两种。目前只有交流薄膜电致发光显示板 (ACFEL) 最先进,其他类型由于寿命和彩色问题而无人投资。

1983 年 Sharp 生产了第一批 TFEL 产品。20 世纪 90 年代 ACFEL 的水平已经达到 10 in、 1024×768 个像素,最大功率可降到 20 W 左右。ACFEL 的主要特点是成本低,可靠性较高,三原色彩色都有合理的发光效率 ($0.8 \sim 5\text{ lm/W}$);即信息容量高、寿命长。

ACFEL 在改进发光效率,特别是蓝光的发光效率和大尺寸彩色屏幕方面还需要做很多的工作,在与单色 PDP 和 AM-LCD 竞争中处于劣势。但 ACFEL 是目前唯一具有优异环境性能的全固体平板显示器件,在工作条件恶劣和对体积有严格要求的场合获得广泛应用,如大量用于美军飞机和主战坦克,以及工业和医疗设备中。

4. 真空荧光管显示器件 (VFD)

真空荧光管显示器件 (Vacuum Fluorescent Display, VFD) 由置于密封的玻璃腔体内的阴极、栅极和表面涂敷有发光材料的阳极组成。发光材料在电子的轰击下发光,阳极电压一般为 $10 \sim 20\text{ V}$,是一种低能阴极射线材料。20 世纪 60 年代,日本伊势 (ISE) 公司的中村正改进了 $\text{ZnO}:\text{Zn}$ 发光材料的制造和涂敷工艺选择了新的电极

结构, 获得了 20 V 低压条件下的显示器, 其后这种显示器迅速商业化。早期的产品外形像电子管, 显示内容从一位数码发展到多位数码, 工艺上大量采用丝网印刷, 适合大批量生产, 可显示数码、文字和符号。采用薄膜工艺制作的阳极基板, 可以达到比较高的分辨率, 用其工艺制作的矩阵屏可显示图表、文字。结合 TFT 技术制作的显示屏可显示视频图像, 颜色也由单一的蓝绿色发展到多色。

VFD 的主要特点是对于低信息容量显示成本很低, 寿命长、坚固, 主要用于可大量生产的小尺寸显示器, 在消费类电子显示、仪表、汽车等要求主动发光显示方面很受欢迎。

二、显示器件的分类

电子显示器的分类有多种, 根据不同的方式有不同的分类方法。根据器件技术分类, 电子显示器分为如图 1-1 所示类型。

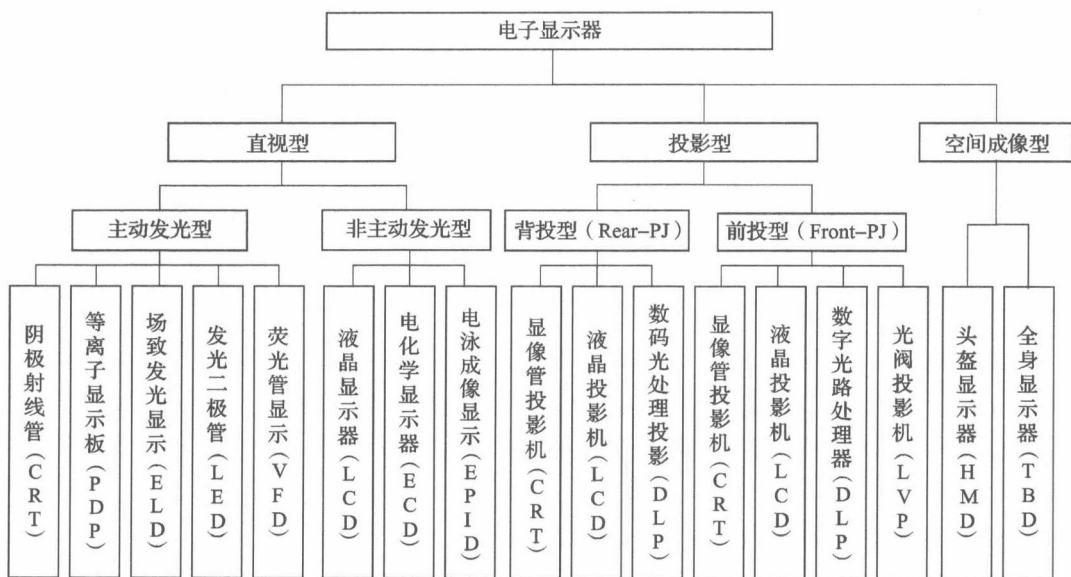


图 1-1 显示设备与装置的分类

(一) 根据电—光信号转换方式分类

在多数场合, 光信息以不同信号强度的形式包含在输入的电信号之中, 相应的显示器件动作方式大致分为下述两类:

1. 主动发光型 (emissive): 又称为发光型或有源能动型, 通过自身发出与输入信号相应的光线进行显示。主动发光显示器件包括 CRT、PDP、ELD 等平板型。

2. 非主动发光型 (non emissive): 又称为受光型或无源被动型, 根据输入信号相应地改变一些光学性质使光的表现方式发生变化的显示。非主动发光显示器件有 LCD、各种光阀管 (light valve) 投影仪等。

(二) 根据应显示的光信息种类分类

根据显示器的不同用途和使用目的, 显示的光信息也可以分为若干类, 大体上有与色调显示有关的功能, 以及与色彩显示有关的功能。

1. 色调显示功能

色调 (tone) 是指图像中从明亮部分到灰暗部分之间明、暗过渡的变化状态。作为显示器的功能,多指显示或者可显示的灰度级 (gray level)。

(1) 二值色调显示:只采用黑白色调显示,常用于文字、数字以及图形的显示。

(2) 多值色调显示:如扇状图形、棒状图形采用面积色调显示三级以上的亮度级。

(3) 全色调显示:用于一般图像的显示,如电视画面上的自然图像信息等。在用模拟信号驱动显示时,表现为连续色调显示;在数字式色调的场合,一般采用 8 bit (256 种色调)。

2. 色彩显示功能

色彩显示功能一般指显示器显示或者能够显示的色彩种类的数量。

(1) 单色显示 (monochrome):仅用白与黑、红与黑等两种颜色进行显示的方式,常用于显示文字、数字及图形等。

(2) 多色显示 (multicolor):如用于区别在扇状图形和棒状图形中的区域等,能显示三种以上的色彩。

(3) 全色显示:显示电视中的自然图像等一般图像的方式。现在几乎所有的显示器件都通过红 (R)、绿 (G)、蓝 (B) 三原色的加色混合显示全色图像。图像信号也由三原色信号混合而成,即通过恰当组合各原色信号的信号电平,显示各种色彩。

在用模拟信号驱动显示时,可以连续显示在色度图上由三原色的色度点组成的三角形中的所有色彩;在用数字信号进行驱动显示的场合,通常用 R、G、B 各原色,可以显示 6 bit (64 种色调) 以上的色调,但常用 8 bit (256 种色调)、1670 万种色彩。

(三) 根据收视状态分类的显示方式

根据收视状态,大体可分为直视型、投影型和空间成像型。

1. 直视型 (direct view type)

原则是指直接观看显示设备上出现的视觉信息的方式。按设备的形态又可分为 CRT 型和平板型。

2. 投影型 (projection type)

投影型是指把由显示设备或者光控装置所产生的比较小的光信息 (如文字、影像等),经一定的光学系统放大并投射到大屏幕后收看的方式。根据投射光线和投影位置不同,可分为如下两种方式:

(1) 前投式 (front projection type):与在电影院类似,是从投射光线来的一侧观看投放在屏幕上的影像的方式。这种方式较容易获得非常大的画面,其屏幕对角线在 2 m 以上,在公共场合或观看录像时常采用这种方式。但当室内不够暗或有照明时,则会因屏幕的反光使图像的反差降低。

(2) 背投式 (rear projection type):从投射光反方向观看屏幕透射光的方式。在

这种方式下,即使室内有光线也无大碍,只是屏幕后面需设完全黑暗的投影室。如果画面的对角线在 2 m 以下,利用镜子对投射光进行适当折射处理,可以把包括屏幕及光学系统在内的所有部件集成电视机形状。背投式适合于家用电视的显示器,可在明亮的室内观看。

3. 空间成像型

空间成像型指采用某种光学手段,在空间形成可供观看图像的方式,可分为能看到虚拟图像的头盔式显示器 (Head Mounted Display, HMD) 及全身显示器 (Total Body Display, TBD) 等。

三、显示器主要参量

显示器可用来重现图像、图形,显示信号的波形、参数。不同用途的显示内容对显示器主要参量的要求也不同,军用座舱显示器对图像主要参量的重视程度依次为亮度、对比度、分辨力、灰度、响应时间等。

(一) 亮度 (Luminance)

亮度 (L) 在显示器光学参量中起着决定性作用。只有在足够的亮度下,才能体现出其他光学参量的作用,可以说亮度不足就没有图像质量可言。

显示器的亮度指标是指屏上加 100% 的驱动信号,显示全白屏时的数值,即屏面亮度的最大值,常称为峰值亮度或简称为屏的亮度。

对显示屏亮度的要求与观看环境有关。若在很暗的环境下,如在电影院中,幕布上的亮度有 30 ~ 45 cd/m^2 就够了;在家庭室内看电视,要求屏上亮度大于 100 cd/m^2 ;在室外观看要求亮度更高,可达 300 cd/m^2 以上,所以对高质量显示器亮度的要求应为 300 cd/m^2 左右。

由于全白屏的机会很少,图像的平均亮度大约只有屏峰值亮度的 1/6 ~ 1/3。因此,制造商喜欢用亮度高达 $\times \times \text{cd}/\text{m}^2$ 来标榜其显示器产品的性能。而顾客应注意其他工作参数,即关心在该指标下的寿命和功耗。单独一个亮度指标不能全面反映显示器的质量。

这里要特别指出亮度与明度 (Brighness) 的区别。亮度是光学仪器 (如亮度计) 的测试值,是一种相对客观的物理量;明度是指人眼感觉到的明暗程度,两者之间不是线性关系。在正常的日常亮度变化范围内,明度大致与亮度的 1/3 次方成比例,即亮度增加为原来的 8 倍,人眼感觉到的明度只增加了 1 倍。

(二) 对比度 (Contrast Ratio)

对比度 (C) 是指画面上最大亮度 $L_{\max}$ 与最小亮度 $L_{\min}$ 之比,即

$$C = \frac{L_{\max}}{L_{\min}} \quad (1-1)$$

对比度又分为暗室对比度和亮室对比度。暗室对比度是指环境光在屏面上的垂直照度不大于 1 lx (勒克斯),意味着环境光在屏面上产生的亮度与 $L_{\min}$ 相比可以忽略不计,即可用式 (1-1) 计算。在普通环境光下,好的图像要求显示器的对比度应大于 30。商家宣传某种显示器对比度达到 500 或 1000,一般来说指的是暗室对比度。

暗室对比度对于环境光较弱的情况比较重要。

如果环境光在屏面上产生的亮度不能忽略, 设为 $L_{\text{外}}$, 则对比度需用下式计算

$$C = \frac{L_{\text{max}} + L_{\text{外}}}{L_{\text{min}} + L_{\text{外}}} \quad (1-2)$$

环境光在屏上的照度转化为外光亮度 $L_{\text{外}}$ 的大小, 与屏的漫反射率有关。例如, LCD 屏的漫反射率很低, 其亮室对比度几乎与外光亮度关系不大, 因此 LCD 电视特别适合于在环境光强的公共场所观看。

单独的亮度指标对于图像传送没有意义。观看图像, 就是观看图像各处的对比度。电视传送景物图像时, 要求图像上各点间的亮度比值与原景物上各点间的亮度比值一一对应。由于人们总是希望在一定环境照明下观看显示器, 这时图像具有大的对比度, 则必须要求有高的 L_{max} 。因此, 由于军用座舱显示器所处环境外光很强, 为获得比较高的对比度, 对显示器的亮度值要求非常高。

(三) 分辨力 (Resolution)

分辨力是人眼观察图像清晰程度的标志。对于 CRT 显示, 用光栅高度 (帧高) 范围内能分辨的等宽度黑白条纹 (对比度为 100%) 数目来表示分辨力; 对于用矩阵显示的平板显示器, 常用行结构条数即电极线数字来表示分辨力。如果在垂直方向能分辨 250 对黑白条纹, 就称垂直分辨力为 500 行 (线)。有时也用光点直径来表示, 用光栅高度除以扫描线数, 即可算出一条亮线的宽度, 此宽度即为荧光屏上光点直径的大小。在显示器件中, 光点直径为几微米到几千微米。一般来说, 对角线为 23 ~ 53 cm 的电视显像管的光点直径为 0.2 ~ 0.5 mm。

为了显示普通电视图像, 要求扫描行电极数为 600; 为了显示高清晰度电视图像, 则要求扫描行电极数大于 1000; 如果以显示文字、图表为主, 如手机屏, 则结构行数达到 180 ~ 240 行就算是高档显示屏了。

只有兼备高分辨力、高亮度和高对比度的图像才算是高清晰度的图像, 所以这三个指标是获得高质量图像显示所必不可少的条件。

(四) 灰度 (Grey) 与灰度等级 (Grey Scale Level)

灰度是图像从亮到暗的明暗层次, 反映了人眼对光亮度的感觉, 即人眼的明度。图像有灰度级别, 灰度级越高, 图像层次越分明, 图像越柔和。眼睛可分辨的最大灰度级大致为 100 级。在显示技术中, 把数字、英文字母、汉字及特殊符号等称为字码, 把机械零件等线条图称为图形, 显示字码、图形、表格曲线对灰度没有要求, 只要对比度较高即可。

灰度等级与灰度不是同一个概念。灰度等级 (也称为亮度等级) 其实就是指画面上亮度的等级差别, 是显示屏上输入的驱动信号电平的最大量化级数。在 PDP、LCD 电视机中, 对电视信号模拟量用 8 bit 数字量采样, 即可显示幅度从 0, 1, 2, ..., 255 共 256 个输入信号电平等级, 故能显示 256 个亮度等级或称灰度等级。

按照韦伯 - 费赫涅耳生理学定律, 人眼感觉到的明度 B 与亮度 L 的对数成正比, 即

$$B = K \ln L \quad (1-3)$$

式中： K 是人眼对亮度的感度系数。

对式 (1-3) 处理后得到亮度阈值与明度之间的关系，可用下式表示

$$\Delta L_{th} = S_0 B \quad (1-4)$$

式中： ΔL_{th} 表示人眼所能分辨的最小亮度值，称为亮度阈值； S_0 在 0.02 ~ 0.05 之间； B 为人眼感觉到的明度。如果取 $S_0 = 0.03$ ，则在等分的 256 级亮度等级中，当亮度从 250 变化到 256 时，人眼感觉不到亮度的变化；当亮度从 2 变到 3 时，人眼会感觉到有大的亮度变化。

为了检查电视机的调整状态是否合适，可在电视技术中传送一个灰度测试卡，从黑到白共 10 级，通常电视能调出 7 ~ 8 级灰度已经属于比较优秀。在电视灰度测试卡中，两个灰度级之间可分辨的亮度层次约为 7 级。

简而言之，灰度与灰度等级的区别如下：灰度级对应的是亮度的等比级数排列；灰度等级对应的是亮度的等差级数排列。

(五) 响应时间

响应时间是指从施加电压到出现图像显示的时间，又称为上升时间，电视图像显示时，要求小于 1/30 s 的响应时间。一般主动发光型显示器件的响应时间都可小于 0.1 ms，而非主动发光型的 LCD 显示器件的响应时间为 10 ~ 50 ms，在显示快速运动的电视图像时，响应时间太长会出现拖尾和余辉，使图像模糊。所以液晶显示器在用于图像缓慢变化的计算机显示时，其响应时间没有问题，用于显示电视图像时需要提高响应时间。

(六) 显示色

显示色是指发光型显示器件发光的颜色和非发光型显示器件透射或反射光的颜色。显示色分为黑白、单色、多色和全色四大类。人眼已经适应日光环境，所以电视图像一般选择彩色和黑、白色。由于 CRT 电视机已经能够显示色彩十分逼真的全彩色电视图像，所以平板显示器要在电视领域与 CRT 抗争，也必须实现全彩色。大部分发光型平板显示器比较容易实现红色或绿色，但在实现蓝光时却存在着巨大的困难，如高效率的蓝光 EL 至今仍未开发出来，从而严重影响了它的推广；对于非发光型显示器件如 LCD，则是通过在黑白显示屏上附加滤色膜后实现了彩色显示。因此，对于某种平板显示器件，只有解决了彩色显示问题，才有可能在民用方面获得大的发展。

第二节 色度学基本知识

人们之所以能在显示器件上看到所要了解的信息，是由于显示器件用电光转换方法把信息用亮度和色彩显示出来。色度学是彩色显示的基础理论之一，它的任务是研究人眼对彩色视觉定性和定量的规律及其在彩色显示中的应用。

一、彩色三要素

色调、色饱和度、亮度是组成彩色的三要素。任何一束光对人眼引起的视觉作用都可以用彩色三要素来描述。

色调是指光的颜色，常说的赤、橙、黄、绿、青、蓝、紫等就表示不同的色调。色调与光的频率有关，改变光的频谱成分就可以使光的色调发生变化。

色饱和度是指颜色的深浅程度。饱和度高说明颜色深，饱和度低说明颜色浅。饱和度与色光中白光成分的多少有关，白光越多，饱和度越低；白光越少，饱和度越高。当白光强度为 0 时，饱和度为 100%；当白光与某一颜色光强度相等时，饱和度为 50%；如果某一颜色的光强度为 0，只有白光，则饱和度变为 0。在彩色显示中，色调和色饱和度常称为色度。

亮度是指光线所引起的人眼明暗视觉的程度。对于色调和饱和度固定的光，当它的全部能量增强时，亮度会增加；当全部能量减少时，亮度会减小。物体的亮度与照射光线的强度有关，同一物体的亮度会因照射光强度的不同而不同。

二、三基色原理

自然界中所观察到的各种颜色几乎都能由三种基色以不同的比例混合而成，而绝大多数的颜色也都能分解为三种基色。这三种基色必须是相互独立的，其中任一色都不能由其他两色混合产生，这就是三基色原理。原则上三基色的选择是任意的，但考虑到人眼的锥状感光细胞对红（R）、绿（G）、蓝（B）三基色反应最灵敏，配色范围较广，因此在彩色显示中选用了红、绿、蓝作为三基色。三基色原理主要用于 CRT 型显示器件。

三、人眼视觉特性

在人的感觉器官中，人眼的视觉是最重要的一种。它不仅能收集可见光信息，而且具有识别能力。

人眼的简要结构如图 1-2 所示。物体反射的光通过晶状体（透镜）在视网膜上成像。视网膜是由柱状细胞和锥状细胞组成的光辐射接收器件，其作用相当于照相机

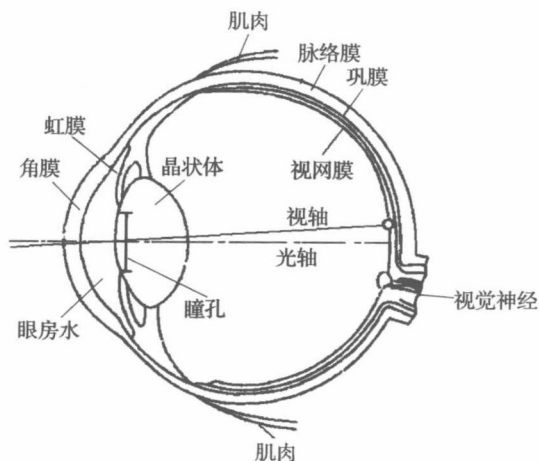


图 1-2 人眼的简要结构

中的感光胶片。人眼中的锥状细胞约有 700 万个, 大多数分布于视网膜上正对着瞳孔的中央部分; 柱状细胞超过 1 亿个, 分布在视网膜的周围。两种细胞具有完全不同的性质和功能, 柱状细胞对光刺激极为敏感, 感光度高, 能感觉弱光, 但分辨率低, 完全不感色; 锥状细胞相反, 感光度低, 分辨率高, 能对各色光有不同的感受。

第三节 光度学基本知识

对显示器的显示性能进行测定, 就会涉及测光的问题。测光是指对光量的测定。人类眼睛只能感知波长范围为 380 ~ 780 nm 可见光, 对不同波长可见光的感觉也不一样, 因而在对光的定量测试中, 必须把各种波长与人的视觉敏感度联系起来, 这意味着光度学中所有的量都是心理物理量。

一、光度学参数与单位

视觉感受因素是人们为有效地接受视觉信息而提出的一些要求。这些要求由一些参数表示, 其中包括光强、光通量、照度、亮度等测试显示设备重要指标的光度学参数。

(一) 光强

光强, 即发光强度 (Luminous Intensity), 用符号 I 表示。光强的单位是坎德拉, 符号为 cd (坎), 这是英文 candela 的缩写。坎德拉是国际单位制中的基本单位。1979 年第十六届国际计量大会定义发光强度单位“坎德拉”: 坎德拉是光源在给定方向的发光强度, 该光源发出频率为 540×10^{12} Hz 的单色辐射, 且在此方向的辐射强度为 $1/683$ W/sr (瓦每球面度)。sr (球面度) 是立体角的单位。以原点 D 为中心、半径为 r 的球面, 被顶点也为 O 的锥面所截的面积为 dA , 则立体角 $d\Omega = dA/r^2$ 。由于这个球的表面积为 $4\pi r^2$, 所以整个球面对应于球心的立体角为 4π 球面度。单位立体角即 1 球面度。因此如果辐射强度是 1 W/sr, 该光源的发光强度是 683 cd。这样, 光度技术完全建立在辐射度技术基础上。通过对辐射的测量, 就可以实现对光的测量。

(二) 光通量

辐射是由电磁波或粒子发射或传递能量的一种现象。单位时间内辐射的能量可以用辐射通量表示。辐射通量 (Radiant Flux) 或辐射功率 (Radiant Power) 是以辐射形式发射、传播或接收的功率, 单位是 W (瓦), 用符号 Φ_e 表示

$$\Phi_e = dQ_e/dt \quad (1-1)$$

其中: Q_e ——可以包含任意波长的电磁辐射能量, J;

t ——时间, s。

光是能够引起视觉的辐射。光通量 (Luminous Flux) 是人眼睛所能感觉的光辐射功率, 单位是 lm (流明)。1 lm = 1 cd · sr, 即发光强度为 1 cd 的点光源在单位立体角 (1 球面度) 内发出的光通量为 1 流明, 用符号 Φ_v 表示。

(三) 照度

照度 (Illuminance) 是物体单位面积上所得到的光通量, 用符号 E 表示

$$E = d\phi_v/dA$$

照度的单位是 lx（勒克斯），即 1 流明的光通量均匀分布在 1 平方米面积上的照度：1 lx = 1 lm/m²。

（四）亮度

亮度（Luminance）是表示发光面发光强弱的物理量，用符号 L 表示，单位是 cd/m²（坎德拉每平方米）。发光面在某一方向的发光强度 I ，除以发光面在该方向的视面积 $A\cos\theta$ ，就是该发光面在这一方向的亮度 L_θ ，即

$$L_\theta = I/A\cos\theta \tag{1-2}$$

图 1-3 表示不同方向的亮度与发光面积、视面积的关系。

亮度通常随观测方向而变，但也有某些光源如太阳、粗糙的发光面和浑浊的散射体等，其亮度与方向无关。对于自身不发光但反射光的表面，也可测它的亮度。还有一些亮度的单位，如尼特（nt）、熙提（sb）等，已经不常用。其中，1 nt 与 1 cd/m² 相等，但尼特不是国际单位制中的规定单位。

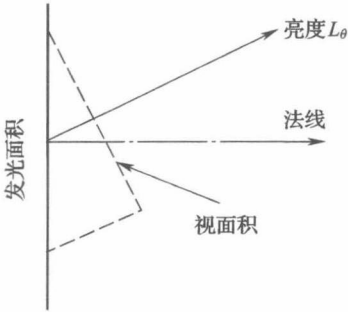


图 1-3 亮度与发光面积、视面积之间的关系

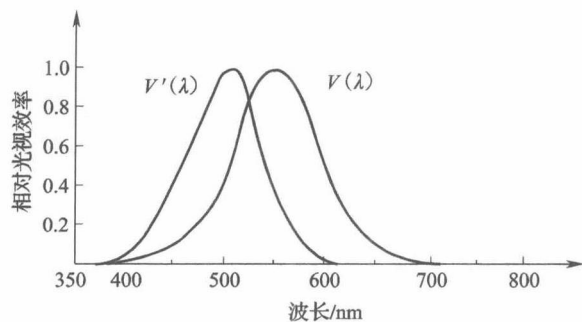
二、光谱光视效率

当发光体发出单色光时，引起人们色觉的颜色完全取决于单色光的波长。波长不同，单色光的颜色也不同，但各色之间是连续变化的。光的颜色与波长范围的大致划分如表 1-2 所示。

表 1-2 颜色与波长范围

颜色	波长范围/nm	颜色	波长范围/nm
红	620 ~ 780	青	470 ~ 495
橙	590 ~ 620	蓝	420 ~ 470
黄	570 ~ 590	紫	380 ~ 420
绿	495 ~ 570		

人眼对于不同波长的光的感受并不相同，所以不同波长的光的辐射功率相等时，其光通量并不相等。试验表明，具有相同辐射量而波长不同的可见光分别作用于人眼，人所感受的明亮程度也有所不同，这表明人的视觉对不同波长的光有不同的灵敏度。人眼对不同波长的光响应的灵敏度是波长的函数，称为光谱光视效率函数，也称为视见率。此外，眼睛有明视觉和暗视觉之分。所谓明适应是指正常人眼对亮度水平在几 cd/m² 以上的适应状态，处于明适应条件下的视觉叫明视觉；人眼所适应的正常亮度水平在百分之几 cd/m² 以下的视觉叫暗视觉。试验表明，观察场明暗程度不同时，光谱光视效率函数也稍有不同。如图 1-4 所示， $V(\lambda)$ 为明视觉光谱光效率函数， $V'(\lambda)$ 为暗视觉光谱光效率函数。

图 1-4 $V(\lambda)$ 和 $V'(\lambda)$ 函数曲线

可以看出, $V(\lambda)$ 和 $V'(\lambda)$ 两者峰值所对应波长有所不同, $V(\lambda)$ 对应峰值在 $\lambda = 555 \text{ nm}$ 处, 而 $V'(\lambda)$ 的峰值在 $\lambda = 507 \text{ nm}$ 处。无论是明视觉还是暗视觉, 光谱响应都在绿色波段最强烈。所以人眼对波长为 555 nm 的黄绿光的视见率为最大, 取为 1; 其他波长的可见光的视见率均小于 1; 红外光与紫外光的视见率等于 0。

习 题

1. 简述显示器件的分类。
2. 三基色原理的主要内容是什么?
3. 简述人眼的视觉生理特性。
4. 简述表征显示器件的主要性能指标。

第二章 显示图像源技术

现代军用飞机座舱中的显示器主要包括平视显示器、多功能显示器、头盔显示器以及仪表显示器等。这些显示器可以采用直观方式观看（如多功能显示器），或者必须经过光学系统才能观看（如平视显示器、头盔显示器）。本章中的图像源指的是显示器的终端显示设备，即平视显示器中的图像源和直观显示方式下的荧光屏。

机载综合显示系统中，根据显示器所处的环境特点、显示的信息种类等，其图像源需要采用不同类型的显示器件，如海军现役主战飞机上的平视显示器普遍采用阴极射线管（CRT）作为图像源，是因为考虑到其具有亮度高、定位精度高等优点；多功能显示器采用液晶显示屏（LCD），是因为 AM-LCD 显示器不断下降的价格和不断提高的图像质量；而某型歼轰机上的指挥仪采用电致发光显示屏（ELD），则是考虑到环境适应性的要求。

第一节 阴极射线管（CRT）

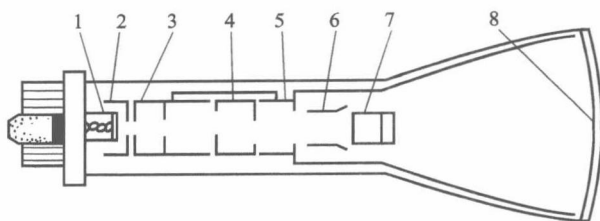
阴极射线管（Cathode Ray Tube, CRT）作为显示器件有单色 CRT 和彩色 CRT 两种。机载电子显示器从开始研制到 20 世纪 70 年代，一直是单色阴极射线管的天下；70 年代末期法国“幻影”2000 战斗机研制的下视显示器采用穿透式三色阴极射线管，成为第一种装机使用的彩色电子显示器。由于海军现役主战飞机上的平显以单色 CRT 为主，所以本节重点介绍单色 CRT，对于彩色 CRT，只予以简单说明。

一、单色阴极射线管

阴极射线管是一种电真空器件，外形结构为漏斗形的玻璃壳。CRT 必然包含三大部件：

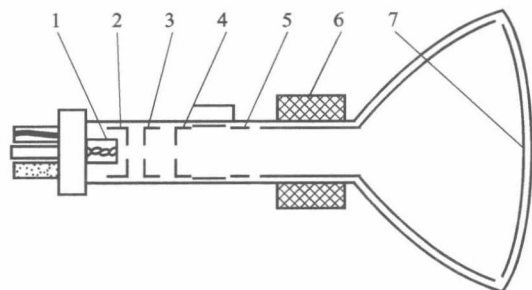
- ①发射电子并将它们会聚成细束的电子枪；
- ②使电子束在荧光屏上扫描的偏转系统；
- ③根据电子束能量强弱发出不同亮度光的荧光屏。

通过控制偏转信号的形式可使电子束在荧光屏上描绘出各种图形和图像。按照电子束偏转方式的不同，CRT 可分为两类：一类是通过电场控制电子束的偏转，称为静电式 CRT，如图 2-1（a）所示；另一类是利用磁场控制电子束的偏转，称为电磁式 CRT，如图 2-1（b）所示。电磁式 CRT 和静电式 CRT 相比具有以下优点：①聚焦特性好，偏转角较大，而且图像清晰；②亮度高；③偏转系统工作在低电压状态，有利于驱动系统的集成化；④电极结构简单，成本低。



(a) 静电式CRT

1—阴极；2—控制栅极；3—第二栅极；4—第一阳极；5—第二阳极；6—垂直偏转板；7—水平偏转板；8—荧光屏



(b) 电磁式CRT

1—阴极；2—控制栅极；3—屏蔽极；4—第一阳极；5—第二阳极；6—偏转线圈；7—荧光屏

图 2-1 CRT 的结构

目前大多数 CRT 显示器都采用电磁式偏转系统，本节只介绍电磁式 CRT。

(一) 电子枪

电子枪由阴极、控制栅极和阳极组成，主要作用是完成电子流的发射、加速和把电子流会聚成很细的电子束。电子枪输入信号的大小可控制电子束电流的强弱。图 2-2 给出了四级电子枪的结构及电场分布情况。

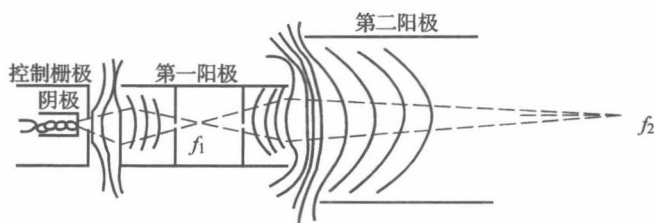


图 2-2 四级电子枪结构及电场分布

1. 结构

(1) 阴极 (K)

现代 CRT 通常采用旁热式氧化物阴极，它由端面涂覆氧化物的圆筒构成，圆筒内有钨丝制的加热灯丝。涂覆氧化物的阴极发射表面很小，呈圆形且具有径向对称的特点，从而克服了直热式阴极所产生的光将会一直照射管子屏幕的中心并易烧伤 CRT 屏幕的缺点。在 CRT 中，阴极不仅要获得较大的发射电流，还要求阴极发射表面的尺寸尽量小。这是因为通过 CRT 聚焦系统之后，在荧光屏上得到的光点图像与