

高清镜头设计：

色差控制

作者：LARRY THORPE

在本系列上一篇文章中，我们了解了各种与光线波长无关的光学像差。除了这些单色像差外，还有多种与有色光相关的像差。换言之，这类像差是与光线的波长相关的。这些像差是由某些随波长变化的基本光学属性造成的。任何透明的材料都会产生这种现象。不存在任何例外。

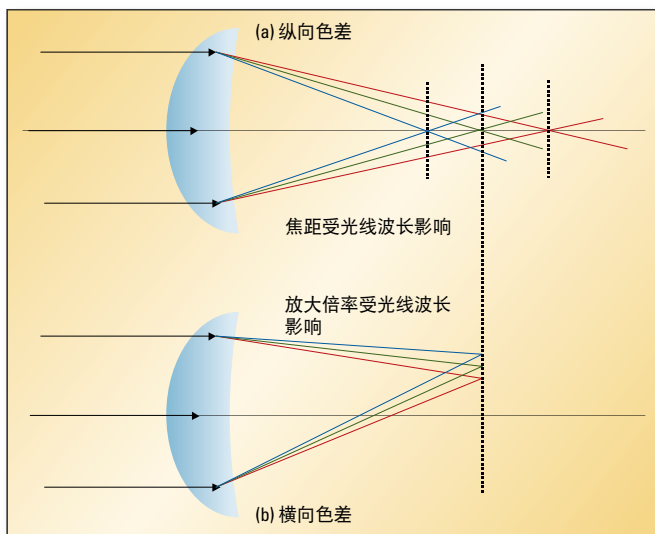


图1 所选RGB波长的两种色差(为清晰起见而有所夸张)。

色差是高清镜头无法避免的问题——对于较小的2/3英寸画幅更为突出。然而，当这些图像色差被转换为高清摄像机中多种频带的电子信号并进入精密的数字处理电路中时，问题才更为严重。如上一篇文章所述，高清摄像机是一种固定而严密的系统。如果是由镜头原因造成RGB视频信号定时误差，则摄像机本身并没有什么有效办法来解决，许多RGB数字处理电路都要应对这个严峻的现实。

高清镜头设计的最大挑战：色差

不同光线的波长在特定的光学材料中具有不同的折射率。这会带来不利影响。任何透明介质的折射率都会随不同颜色光线的波长变化。这种现象称为色散。这样，单个的镜头镜片会对光束中每种颜色的光线形成一个对应的图像，进而形

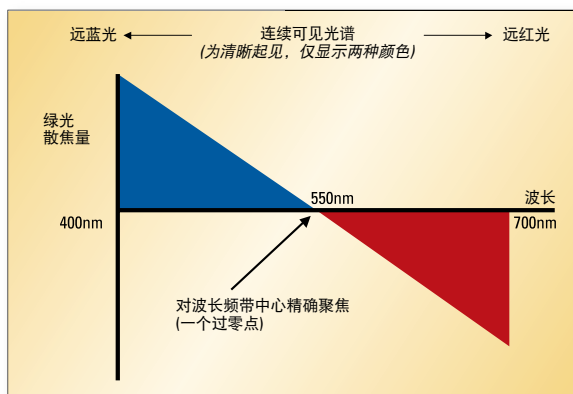


图2 主要色差的形成：色差镜头对光谱中央的绿光部分聚焦，而可见光谱的两端明显散焦。

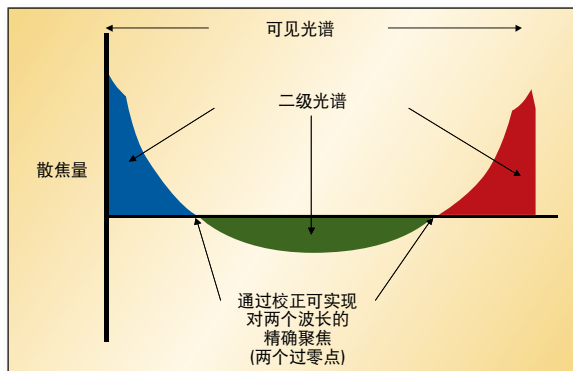


图3 由两个具有不同色散属性镜片组成的补偿透镜组可以对两个波长进行聚焦校正。

成多个图像。这种现象在技术上以两种分别定义而物理上又相互关联的像差来描述：

- 1) 纵向色差——表明对于可见光谱中不同颜色的光线，存在于不同的焦平面。
- 2) 横向色差——表明由于各种颜色光线的焦距不同，导致相应的横向放大倍率的差异。而这又会造成不同颜色图像间明显的重合误差。

图1以简单的图示说明了两种色差的形成。

纵向色差

当白光通过镜头的镜片时，各种波长的光线由于频率不同而呈现不同程度的折射。这会使整个可见光谱中不同颜色的光线聚焦在多个焦平面上。图1说明了连续光谱中三种选定的RGB颜色的纵向色差。对于中央光轴上的物点，各种颜色光线的成像在相同的光轴上，但不同波长光线在光轴上聚焦的位置并不相同。一般来说，波长较短的蓝光折射率较大。因此，单个镜片的作用在某种程度上类似棱镜，会将光谱中的蓝光部分聚焦在离镜头最近

的位置。

纵向色差实际上是一种循迹误差。当镜头聚焦在绿光波长时，纵向色差会导致可见光谱中的蓝光和红光光线散焦(参见图2)。这会导致场景中相应色彩的细节模糊以及清晰的亮度过渡中的锐度降低。如果绿光在摄像机图像传感器上准确地聚焦，则红光和蓝光将会生成弥散圆。也称为一级光谱。未经校正的镜片称为色差设计。

减少色差的最常见方法，是采用具有相同色散特性而方向相反的不同光学材料组成成对的镜片组。这种镜片组可以使两种选定波长的光线同时合焦(参见图3)。这种结构称为消色差双合透镜。

在对两种波长的光线进行第一级校正后，剩下的光线称为二级光谱(参见图3)。可见光谱中间的绿光与红光、蓝光具有很大的差异。焦距越长、光圈越大，则由二级光谱产生的色差越明显。

要想有效控制镜头色差，必须采取更高级别的校正措施。采用三个具有不同色散属性镜片构成的镜头组，称为复消色差透镜。校正镜片的数量还可以增加到四个，这种镜头组称为超消色差透镜。但是，增加过零点(图3中为两个)的数量并没有控制这些过零点之间的颜色偏差重要。要将二级光谱控制到可接受的水平，就需要使用特殊的光学材料。一种萤石镜片与低色散镜片结合可以有效控制中央的绿光光谱。如今，还有其他新型玻璃材料可以选择。

在优化这些校正策略后，残余的纵向色差仍然会随焦距而变化。这也是所有变焦镜头面临的问题。经过不懈的努力，典型的高性能高清演播室镜头设计可以使这种波动在短焦距端得到良好控制，但在长焦端仍然难以解决(参见图4)。

横向色差

色散还会导致图像放大倍率与波长形成函数关系。这会造成非常精细的边缘产生彩色镶边和亮度的调制传递函数值(MTF)下降，从而影响总体的图像锐度。这样将会造成实际图像的重合误差，如图1(b)所示(第78页)。如何最大限度地减小色差，是所有高清变焦镜头设计中最艰巨的挑战。

横向色差还导致一级光谱和二级光谱的产生。我们在设计中采用多镜片组和特殊材料来控制二级光谱。同时对现代变焦镜头中的纵向色差和横向色差优化进行整体的控制，这本身就是技术上的巨大成就。

一般来说，从摄像机输出高清视频来看，由于摄像机RGB视频处理系统继发效应的影响，在主观上横向色差效应比纵向色差更为明显。

横向色差从图像中心到边缘逐渐增强。一般在选定的3.3mm图像高度处测量横向色差(参见图5)。

在镜头所有的像差中，横向色差是最令人难以容忍的。即使是采用当今最严格公差制造的镜头，主观上仍然可以看到明显的横向色差。图6显示了关于当代2/3英寸高清演播室镜头中横向色差的一些严格的规格。

当镜头镜片移动时(变焦和聚焦中)，这种色差更加难以控制。在变焦操作过程中玻璃镜片发生移动时，横向色差将随焦距改变而变化(参见图7)。横向色差通常在广角端最大。

色差与镜头-摄像机系统

我们很早就已经认识到，镜头与摄像机棱镜光学结构构成了非常复杂的光学系统。幸好，在2/3英寸的16:9画幅成为高清摄像机和摄录一体机主流光学格式之前，这种复杂性就已经得到了非常及时的处理。除了对镜头-摄像机分辨率和色彩还原的考虑外，所有的摄像机与镜头制造商都深刻地认识到色差是一种无法完全消除且又令人遗憾的缺陷。

在二十世纪八十年代后期，广播技术协会(BTA)的摄像机制造商与光学器件制造商合作，解决了2/3英寸高清摄像机与镜头的各种接口——包括光学、机械和电气接口的问题。该研究还包括设法解决纵向色差、横向色差及其随焦距变化的问题。

此标准中的一个关键规格是对48mm的精确定位截距尺寸达成一致(为适应未来棱镜光学结构的发展而设计)。另一个规格是相对于绿光图像传感器，红光(10微米)和蓝光(5微米)图像传感器路径长度的偏移(参见图8)。这些特定的数值是多家光学制造商在对多种变量长期研究之后，对各自设计进行平衡取舍后取得的。虽然这并不是最完美的解决方案，但毕竟在一定程度上解决了色差问题。

这种折中方案是高清镜头能够在所有2/3英寸图像平台的高清摄像机(无论哪个制造商)上实现互换的重要条件。

横向色差与高清摄像机处理

横向色差最为隐蔽的问题，在于其对高清摄像机的RGB视频处理系统造成的影响。镜头的横向色差会导致在精确安装的图像传感器上生成三个具有相关差分

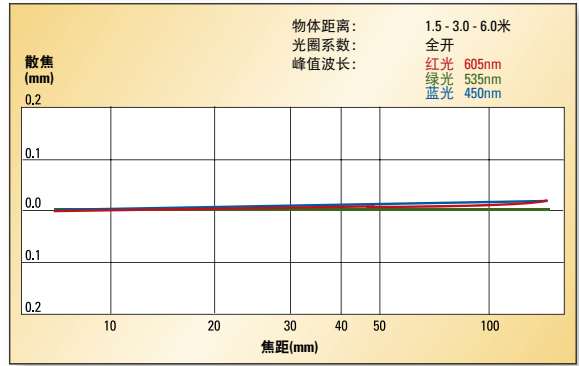


图4 高清变焦镜头红光和蓝光波长的纵向色差随焦距变化——这种色差一般在长焦距端最大。

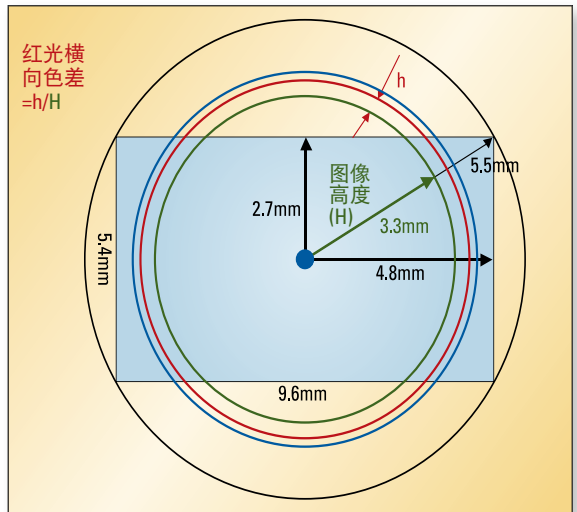


图5 在2/3英寸的16:9画幅中特定的3.3mm图像高度处测量横向色差(为清晰起见而有所夸张)。

定时误差的视频信号。这是数字高清摄像机在某种条件下无法避免的差分RGB定时误差。

图9说明了这种现象的产生原理。假定镜头-摄像机对白色背景进行拍摄，在横向色差通常出现的图像边缘位置有一小块黑色区域。由于红光和蓝光波长的放大倍率比绿光大，白色和黑色之间所有的光学过渡都将受到影响。而由此产生的存在定时误差的镜头光学输出，现在由摄像机

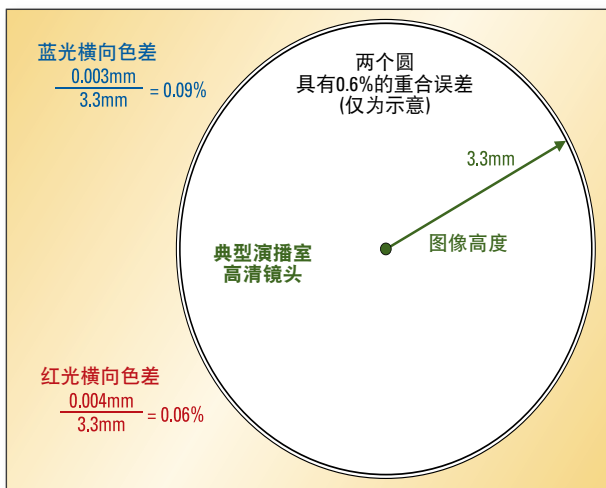


图6 以两个具有0.6%重合误差的圆为参考,来说明现代高清演播室镜头的横向色差大小。实际的红光和蓝光色差计算结果如图所示。

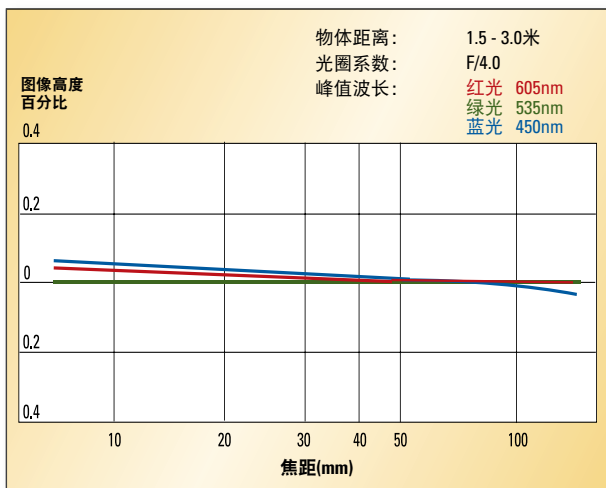


图7 此处说明了高清演播室变焦镜头的横向色差随焦距改变而变化。这种色差一般在广角端最大。

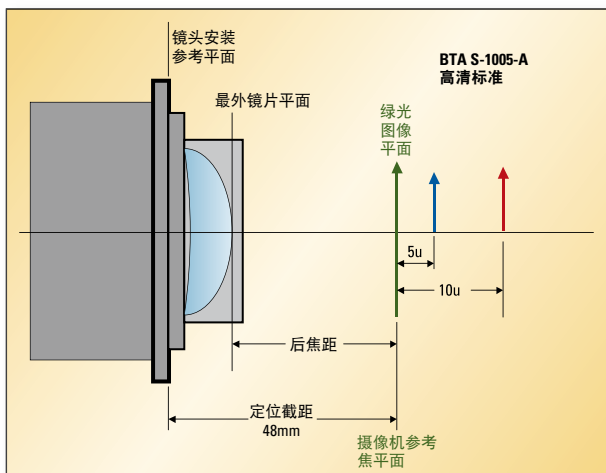


图8 对所有2/3英寸高清摄像机标准化的红光和蓝光图像传感器的物理偏移——1994 BTA S-1005-A标准。

图像传感器转换成数字RGB信号。一条穿过图9(a)所示的黑色方块的扫描线,将产生水平的白到黑过渡的视频图像,然后是黑到白过渡图像,如图9(b)所示。

假定沿图像边缘方向色差逐渐增大,则第二个黑到白过渡图像的延迟将轻微增大。当随后三个RGB视频分量经过混合形成Luma Y信号时,白到黑到白过渡图像将前后带上颜色——前面为蓝色-品红过渡,后面为绿色-黄色过渡。在实际中,由于过渡具有有限的上升时间(随数字视频系统有限带宽增加),其边缘会带上更多色彩。这时,就可以明显地看到二级光谱的影响——在原始白到黑到白的场景所要求的亮度再现上增加了彩色镶边。

在数字RGB处理系统中进行多种视频处理时,极易受三种视频信号之间差分定时误差的影响,使上述情况更加严重。这些电路可以将这三种信号相加或相减。包括线性矩阵(用于色度控制)、图像细节(用于锐度增强)和差分数字滤波(当形成Y、R-Y和B-Y分量信号时)。不幸的是,相关的定时误差在水平和垂直方向都会出现(这里需要进行不同的RGB处理)。必须指出,这些误差并非是由高清摄像机产生的,而是由镜头造成的。摄像机无法避免地要对镜头造成的差分误差进行转换。影响这些摄像机电路的初始镜头误差与摄像机本身的特定设置、调整的综合作用,将会影响彩色镶边的大小和主观清晰度。其清晰度在很大程度上取决于图像的内容。

幸好,根据我们丰富的经验,多数场景都不易产生色差。在演播室布景中拍摄的高清视频中,看到的色差主观上并不明显(尽管有时会出现)。尽管色差的确可能存在,但通常人眼在较大的高清屏幕上还是很难看出来的。另一方面,在室外使用广角端拍摄时,偶尔会遇到高对比度的景物,其色差在高清监视器上会特别明显。对于较小的2/3英寸高清画幅,这些缺陷从统计学角度看有时会出现——色差只是这些现实问题之一,几乎没有办法消除。镜头制造商将继续全力应对这一挑战,设法解决这个光学难题。

Larry Thorpe是佳能美国广播器材产品部的市场总监。

总结

横向色差对于2/3英寸画幅的高清系统仍然是一项最艰巨的挑战。对于这种较小画幅,当前的技术规

格无疑是一个卓越的成就，也是过去几十年来光学设计发展的有力证明。然而，在某些拍摄条件下，还是会在高清图像的边缘产生彩色镶边。

在对各种摄像机和镜头进行合理评估时，多种镜头-摄像机改进方法都设法解决这个问题，结果却常常令人沮丧。即使在苛刻的测试条件下，各种镜头和摄像机组合也只能改变出现彩色镶边影响的类型。尽管各大制造商采用不同的色差处理优化策略的镜头设计，但无论哪种方案都无法彻底摆脱色差问题。而不同高清摄像机RGB视频处理中的数字设计策略虽然可以改善一些转换效果，却还是不能彻底消除由镜头色差造成的图像问题。

在这种困境下，明智做法是在各种镜头和摄像机经常使用的环境中进行测试，在最可能的场景照明条件、焦距范围、光圈设置及摄像机视频处理设置下，详细地检查这些问题。如果可以在最终使用系统的布景下进行拍摄，测试效果会更好。

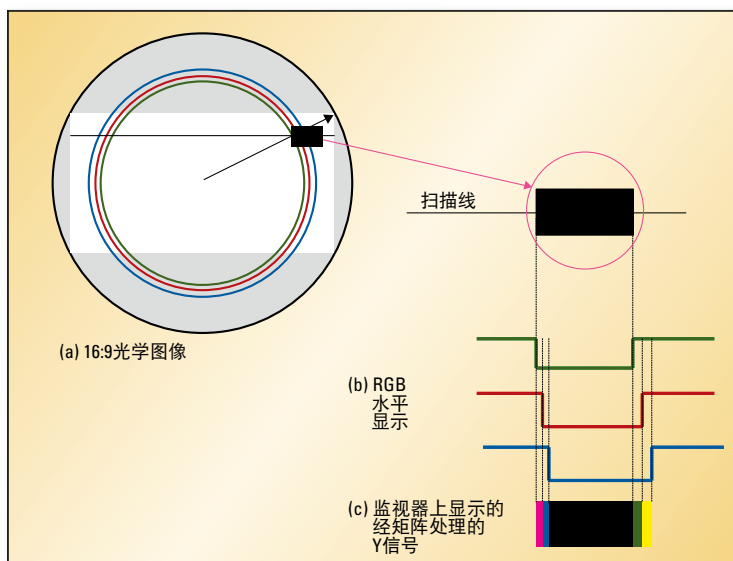


图9 白到黑过渡之后的黑到白过渡周围的彩色镶边(为清晰起见而有所夸张)。