

广播电视工程 7/05 白皮书教程

高清镜头设计：光学像差管理

正如本教程“高清镜头设计”系列前几个版本中所讨论的那样，现代高清镜头的设计包含设法解决大量的变量。这样设计的目的是在各种基本光学和物理范畴的限制以内，实现所需性能标准(经常与设计标准发生冲突)的全局优化。功能强大的计算机、先进的软件、新型的光学材料以及制造流程的改进，都为实现当今高清镜头出色的整体性能提供了可能。

尽管这些新型高清镜头具有出色的性能，但是仍然受到多种光学缺陷的挑战，这些缺陷虽然可以整体上减少到最小程度，却不能彻底克服。光学缺陷通常分为两种类型：

(a)光学图像的失真(形状和大小)；

(b)像差，即与通过镜头镜片的光线的基本特性相关的图像缺陷。

总之，高清镜头设计策略旨在寻求对所有这些因素进行优化，以使像差降低到可以接受的水平，并使图像缺陷达到在主观上难以识别的效果。

光学图像失真

失真是所有镜头固有的特点；这与镜头对所产生图像的整体大小和形状进行的改变有关。

几何失真

这种失真改变了光学像平面中物体场景的几何表现形式的准确性。图像形状的失真，即枕形失真效果(正几何失真)或桶形失真效果(负几何失真)，其失真量通常表示为图像高度的百分比，如下图 1 所示。

一般情况下，变焦镜头在短焦距(即广角端)时将会表现为桶形失真(负失真)，而在长焦端时表现为枕形失真(正失真)。此外，高清镜头有更大的 16:9 长宽比，对在整个变焦范围内控制几何失真形成了更严峻的挑战。在 2/3 英寸画幅尺寸以内，4:3 图像中的 1.5 个百分点的枕形失真或桶形失真几乎转化为 16:9 格式下 2.2 个百分点的失真。在 16:9 宽屏幕中，此种几何图像失真的剧增如图 1 所示。

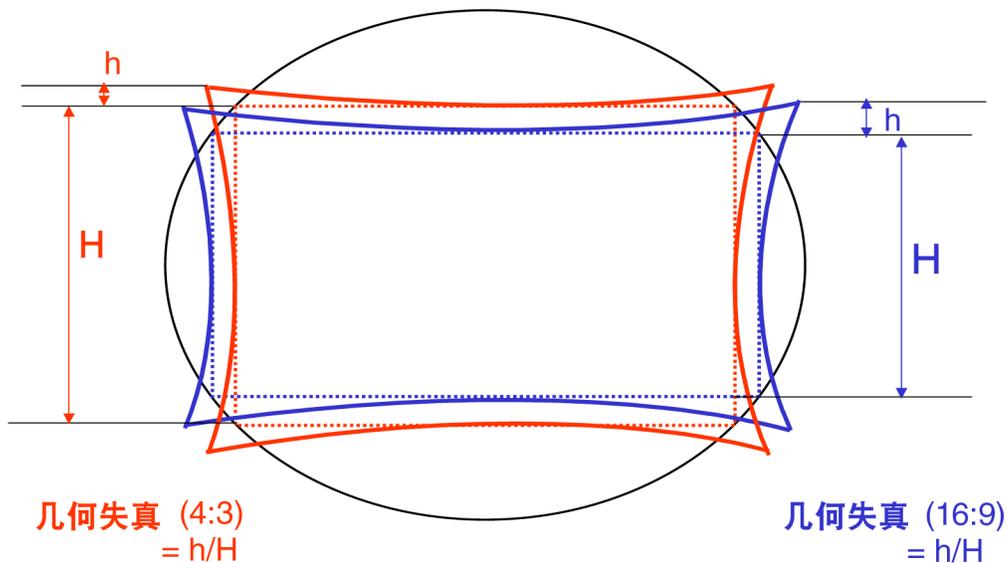


图 1: 显示长宽比为 4:3 的图像与长宽比为 16:9 的图像的相同枕形失真(正几何失真)程度——请注意：失真百分比在宽屏幕图像中较为明显。

聚焦时的呼吸效应

聚焦时的呼吸效应并未严格划分为失真。然而在从业者看来，它表现为图像失真。*聚焦时的呼吸效应*是指聚焦控制时图像尺寸随之改变的现象。这是因在聚焦时移动光学镜片而产生的多余的图像视角改变(不需要的变焦结果)。习惯上在 ENG 拍摄中可接受此现象，而在高端电视剧和电影拍摄中则完全不可接受。

光学图像像差

光学像差主要由基本光学物理限制产生，在整体镜头设计中必须对其做出实际妥协(尤其是涉及到与摄像机分光系统密切相关的设计标准时)。由于每个光学镜片无法避免的制造像差，各种像差的表现程度也是随之变化的。

(1) 独立于波长的像差

很久以前，以数学的方法已预测出有四种像差，它们与通过单个镜头镜片的单色(单波长)光的通道有关系。之前介绍的几何失真也作为附加因素包含在该预测中。

散焦像差

有四种损伤聚焦的光学像差。如果将细小的单色(单波长)光点发送到单个镜头镜片，一定程度上将会出现以下所述的所有四种散焦缺陷。

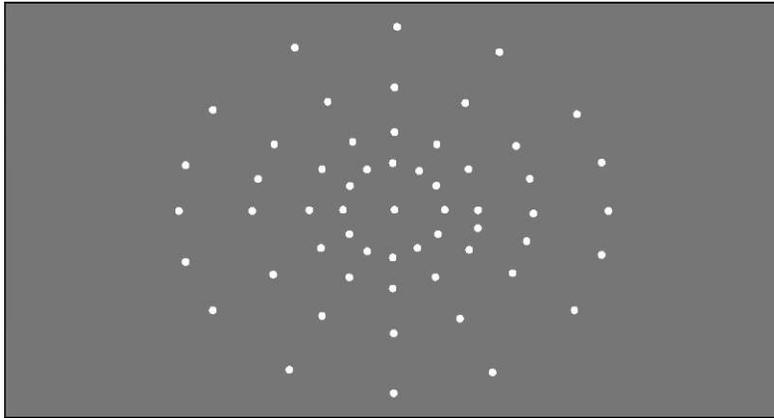


图 2：此光点图形用于表示光线输入镜头系统，包含一束可以促成镜头聚焦像差的无穷多的小点光源。

球面像差

常见于所有由球面镜片组成的镜头引起的像差。穿过透镜外边缘的光线(从透镜光轴上的物点发出)较穿过透镜中央光轴的光线，其焦点位置更靠近透镜，因此聚焦的差异便出现了。

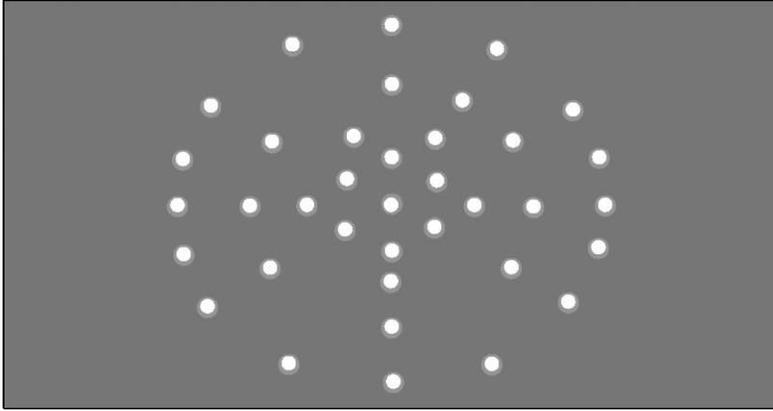


图 3：显示镜头光线出射处的球面像差(为便于观看已进行放大)。

将具有对等球面像差的镜头镜片制作成复合透镜可以极大地降低球面像差。近年来非球面镜头镜片设计(意义重大的制造挑战)在减弱此缺陷上起到了一定作用。

彗形像差

如果因球面失真而对镜头进行完全校正，则场景中远离中央光轴的点上可能还会引起其他形式的像差。如果从一个点发出的光线与中央光轴形成一定角度入射，则光线将表现为彗状尾而非形成聚焦点；此种像差称为彗形像差或慧差。通常把这种有时看起来靠近尾部边缘的模糊物称为彗形眩光。

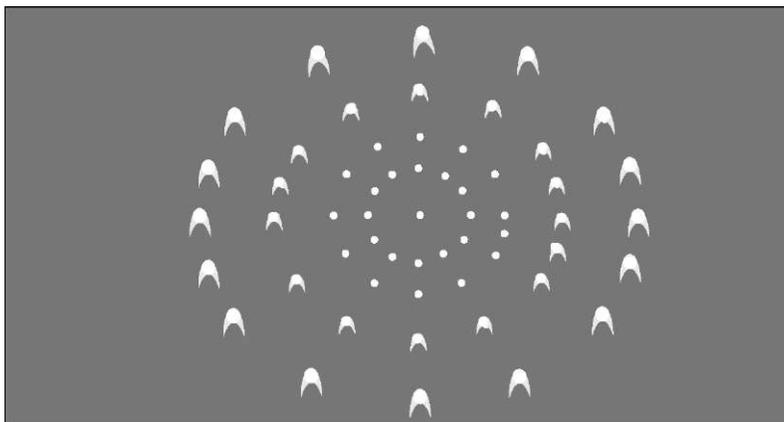


图 4：彗形眩光拍摄形态图解(同样以放大尺寸显示)。

像场弯曲

指镜头未能将平面场景物体聚焦为平面光学图像时产生的一种散焦现象。如果物平面中央精确地聚焦，则物平面边缘失焦。相反，如果物平面边缘对称地聚焦，则图像中央失焦。事实上，镜头正形成碗状的光学图像。

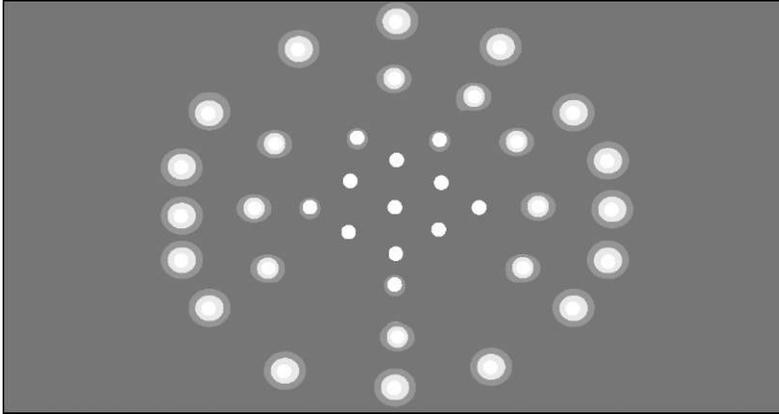


图 5: 请注意与像场弯曲相关的中央至边缘连续的散焦。

像散

因球面失真而经过校正的镜头，有时仍然无法正确聚焦场景中轴外点。相反，在通过镜头产生的图像中，轴外点形成椭圆形状或变为一条线。当无法通过调节镜头获得清晰聚焦时，图像会在两个彼此形成直角的椭圆之间变化。这种像差称为像散。

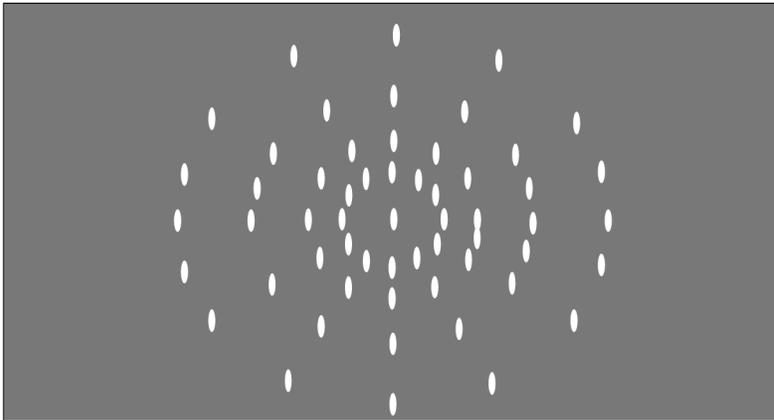


图 5: 显示放大后的镜头像散图例。

这四种像差共同降低了整个图像锐度。在多镜片镜头中这些缺陷的控制构成了至关重要的第二层级的镜头(广播工程, 5/05 “高清镜头设计: 透光性管理”一文中讨论的主题) MTF (调制传递函数)的管理。

(2) 波长相关像差

除了刚刚介绍的单色像差之外, 还有其他多种与有色光相关的像差, 即像差与波长有关。波长像差是由随波长变化而变化的基本光学属性引起的。这些像差是高清镜头无法避免的缺陷。然而对于所有光学设计者而言, 降低波长像差俨然成为最为艰难的设计挑战。

最大的高清镜头设计挑战: 色差

对于一定的光学材料, 不同的光线波长会有不同的折射率。该现象即为*色散*。单个镜头镜片将相应形成一定数量的图像, 光束中出现的每种颜色的光线形成一个图像。从技术上讲, 色差可定义为两种独立的像差: *纵向色差*(构成光束的不同颜色的光线有不同焦平面)和*横向色差*(事实上, 有色光线的焦距不同将导致横向放大倍率相应变化, 这样将产生实际的错位)。由于这属于高清成像范畴内重要且具挑战性的话题, 故将在该系列教程的下一篇文章中单独对其进行深入讨论。

(3) 透光性中的像差

在之前的文章(“高清广播级演播室变焦镜头”, *广播电视工程* 1/05)中, 我们介绍了光通过对穿过镜头的光通量、光通量的频谱定形以及光通量从中央至图像边缘分布进行管理的艰巨性。我们将多镜片镜头系统的透射任务与相应电子传输系统的透射任务作比较。对于生产终极高品质信号输出, 两者具有相似的挑战, 该输出要具有因穿过各自传输系统通道而引起的最少伴随缺陷。

光线穿过镜头时, 因多种缺陷影响, 光学物体图像较暗的部分会受到污染。图像黑色部分的此种污染会极大地降低镜头的对比度, 进而损害镜头 MTF (调制传递函数), 并因此降低整个图像锐度。因物体场景中强光源穿过而引起的独特光学干涉, 整个光学图像也会受到损害。

这些透射缺陷, 从某种意义上说, 属于光学“*信噪比*”问题。正如数码高清摄像系统设计在同时尝试掩盖噪音和其他电子信号(如频谱混叠、阴影、眩光等)时, 也努力提高所有这些共同保证最高品质视频输出的特性那样, 类似的技术努力也与生俱来存在于高清镜头系统设计中。在此, 所有这些透光像差集合类似于系统的光学“*噪点*”。

正如之前文章所讨论的那样, 如果使用更多的镜片, 则管理镜头设计所固有的多个变量时, 附加自由度将更灵活方便。然而, 这样却也增加了空气—玻璃面的数量以及从这些界面反射的光线总量。由此反射的光线将以多种形式(如下所述)影响摄像机图像传感器。

眩光

眩光是由场景中的强光造成的缺陷, 在图像的阴暗区域表现最为明显。强光与变焦镜头内的多个光学表面相互影响, 在轮廓特别分明的强光周围引起光散。这些强光甚至可能来自正在成像的特定图像外侧的物体场景区域。强光还可能反射出内部镜头筒, 或光圈叶片, 或甚至反射出摄像机传感器本身。新型镜头镜片多层镀膜的出现为缓解这些缺陷提供了有效的途径。这些镀膜是镀在光学表面以降低反射和增强透射率的透明薄膜材料。由于高性能的多层镀膜具有增强的保护作用, 故更受青睐。为降低此类像差, 必须充分发挥高品质光学材料、严格控制的生产工艺容差及精心黑化的内部机械表面的作用。

杂光

这是不必要的漫射杂散光, 可以在某些成像条件下快速“模糊”像平面, 从而降低图像对比度。它是光学镜片表面(通常为前部镜片)散射、或光圈快门叶片表面与镜头筒内部表面的反射产生的。使用精密的光学设计、特殊材料、新型镀膜以及严格的生产工艺容差可以控制此类干扰。在强烈的阳光下拍摄时, 适当使用镜头遮光罩也是一种重要的防止图像外强光干扰的保护措施。

重影

指的是轮廓非常清晰的反射的产生，由场景中的阳光或其他常见强光源引起，可以在多个透镜表面激发一系列非常复杂的反射。重影常常作为构成光圈调节装置的机械光阑的图像显现出来，且通常在该光源的对等位置出现(因此看起来像重影)。在严重情况下，可以显示为多个此类图像。因镜头而异，这些图像可能为单色或不同的色彩再现。即使强光光源位于图像区域以外，也可形成重影图像。为减少此类缺陷，镜头表面已进行特殊镀膜。

总结

现在，我们可以认识到，比起现代数码高清摄像机，多镜片高清镜头系统的本质是更为复杂和稳固的系统。数码摄像机进行严格的技术控制(通过精密的固定传感器结构和精密的数码处理实现)。相比之下，正是由于光学物理的本质，镜头会处于一种高动态状态，即在处理范围广泛的光照水平及焦距时，需要控制多个参数。因此，设计优化策略必须在高清镜头(如更大范围的长变焦户外镜头、演播室镜头、便携式 EFP/ENG 及电影镜头)的类别之间进行显著的改变。设计者寻求各个镜头类别的最佳性能时，这些镜头具体的应用范围决定了设计者指定的优先级。

下一篇文章将继续光学镜头像差的课题，可能还会测试它们中最令人苦恼的像差——色差。这些最基本的光学物理的分支与任何透明材料都有关系。在变焦镜头的物理动态中对其进行控制并达到可以接受的水平是几十年来光学设计者为之奋斗的目标。在较小的 2/3 英寸画幅内实现极具挑战的高清成像目标的背景下，色差仍是最令人束手无措的图像缺陷。