

白皮书
#2

高清镜头设计

广播级演播室
变焦镜头

前言

本文作为续篇将介绍业界对当前大型广播和制作行业中应用的一系列不同类别的高清镜头的要求和期望。最先要讨论的是,长期以来视为高性能镜头中旗舰产品的广播级演播室镜头。以下将从两个方面详细地介绍高清演播室镜头:首先,阐述现代高清镜头设计是一门精密的科学;其次,为了解下文其他主要制作目的所用镜头的类别奠定基础。

现代高端演播室镜头是光学上的一个奇迹。高清(HD)镜头是技术上取得的巨大进步。镜头设计师必须解决设计中极多的不确定因素,以最大程度地提高各种重要镜头属性,这些属性共同决定了镜头的优异成像性能,而最终影响高清摄像机上的成像质量。这些图像属性在本系列第一篇文章中进行了介绍:灵敏度、对比度、色彩还原及图像锐度等。镜头设计师还要不断克服困难,将光学物理的特性和局限性造成的多种图像缺陷降到最低。他们必须要控制好复杂的实际镜头系统中固有的多种光学像差。

不管对错,很长时间以来,我们就决定彻底地简化已发布的广播级演播室摄像机及其相关的演播室镜头的规格。虽然这样可能节省了许多首席工程师的常规工作,还是存在很多镜头和摄像机设计师必须解决的不明朗的、棘手的现实问题。现代演播室镜头是非常复杂的光学系统,以佳能高清演播室镜头为例,其中包括不少于 34 个单独的光学镜片。

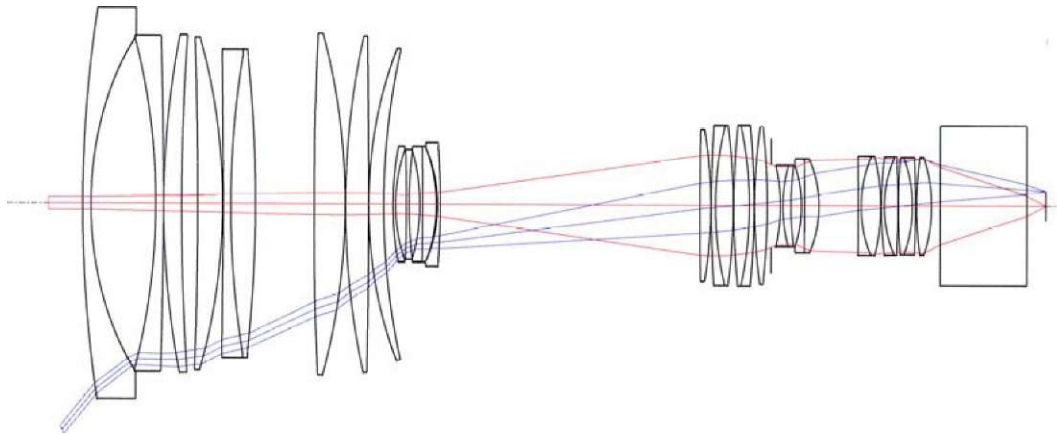


图 1 典型的高清演播室镜头——显示多个光学镜片接连组合在一起,以实现所有现代的操作需求。

用户对现代演播室镜头的需求

现代电视演播室镜头有三个操作属性是广播节目制作人最感兴趣的，特别是摄像师。分别是：

- 图像性能期望
- 操作性能期望
- 镜头功能的数字控制

图像性能期望

在选择特定的演播室镜头时，要以用户对各种镜头属性的评估为根据，这些属性影响优异的图像性能(通常为详细的评比测试的结果)，同时还要分析在镜头设计过程中将各种固有的镜头局限性和光学像差减至最少的程度。终端用户的评估可能存在很大差异，这就是采购之前严格的镜头测试必不可少的原因。

操作性能期望

操作性能期望是指用户对镜头工作的演播室环境的特定需求，例如，与演播室布景相关的组织安排、预期的灯光亮度、所需的视角和变焦范围等，要符合演播室布景和表演的特性，以及摄像师或导演的其他可能的特定要求。

镜头功能的数字控制

随着主要操作功能(如变焦、光圈、聚焦)遥控系统的发展，镜头功能的数字控制得到持续的进步，摄像师操作更为方便。先进的高速伺服系统精益求精，镜头控制也通过数字微电脑技术得到了极大的增强。许多单独的镜头控制器的精确调节功能帮助摄像师进一步增强了能力，使其不但可以控制单独的成像属性，还可以控制单独实时调节的速度、范围和可选的非线性控制特性。这进一步提升了对新闻、电视剧演播室、记录片及现场报导拍摄的创造性控制能力。

图像性能

正如第一篇文章中所强调的，镜头/摄像机系统的图像性能主要是由镜头投射在摄像机图像传感器上的光学图像所预先决定的。在对比度、色彩还原及图像锐度已经由镜头光学系统确定之后，高清摄像机的任务就是按照要求的高清制作标准(SMPTE 274M、SMPTE 296M 或国际 ITU 709)，将这些属性(及其他图像属性)转换为数字方式进行再现。人们最为关注的高清图像性能要素就是图像分辨率。正如即将介绍的内容所述，高清镜头是镜头/摄像机系统中重要的部分。

分辨率和图像锐度

镜头分辨率是最经常讨论的、与高清镜头性能相关的话题，也是人们最缺乏了解的。这是一个极为复杂的话题。我们所感知到的任何电视图像的主观锐度是多种独立锐度特性综合作用的结果，包括镜头、电视摄像机、显示系统，最后是人的眼脑系统本身。在这个总体系中，到目前为止，现代变焦镜头代表着最具挑战性的设计任务。

摄像机分辨率

在现代固态 CCD 图像传感器出现之前，高清电视摄像机采用光敏摄像管来采集图像。这些图像传感器在其图像缺陷方面存在很多技术“包袱”，特别是这些缺陷在整个图像光栅上的异常变化。1992 年 CCD 图像传感器的出现[1]为之前混乱的技术状态带来一个全新的秩序，主要是因为在整个光栅上从图像中央到边缘都实现了稳定的图像质量。这代表了在高清成像方面的巨大进步。然而令人遗憾的是，即使是最好的演播室镜头也难以实现这种稳定性，下面将对此进行讨论。

现代电视摄像机传统地将图像锐度的影响因素描述为一个规格“水平分辨率”，有时还使用另一个规格“垂直分辨率”，但两者之间关联不大。这是广播级演播室摄像机技术指标长期发展的结果。例如，今天，典型的高清摄像机可以指定在已认可的参考频率上的调制深度，如在 800 TVL/ph 的空间频率上，或相关的 27.5MHz 电气频率上(对于 1080 线系统)。某些高清摄像机将单独地使用水平极限分辨率(最高的水平空间频率至少具有 5% 的调制深度)。

尽管找到一个简单的测量方法非常重要(该方法可以确定某个特定的高清摄像机是否满足其分辨率性能规格)，但这些已发布的数字并不能说明摄像机实际的图像锐度性能。相反，很久以前就已确定，可视图像锐度必须与镜头-摄像机系统的调制传递函数值关联起来[2]。

调制传递函数

调制传递函数是一个描述不同空间频率对比度特性的曲线，其范围可从镜头-摄像机系统能够再现的低频直至最高的空间频率。

图中镜头-摄像机系统成像的低频黑白方波的对比度(可能以 50 TVL/ph 的级别)可以被无任何衰减地忠实再现，并能在视频波形监视器上显示全幅的视频电平。该值为参考对比度水平。

随着增加的更高频率的黑白方波的成像，相对于参考对比度水平，相应再现的对比度水平会有所下降。

方波频率范围从 50 TVL/ph 的参考值一直到 1000TVL/ph 的多脉冲波形图，可以在波形监视器上显示相应的视频包络。好像在此频率范围上的对比度水平正在被镜头-摄像机再现系统调制一样。如果以空间频率为横轴(可以光学工程师惯用的每毫米线对数为单位，或以视频工程师惯用的每幅画线为单位)且以对比度为纵轴，来绘制此特性曲线，则这种表示形式就成为此对比度调制的“传递函数”。因此，标题定义为“调制传递函数(MTF)”，参见图 2。

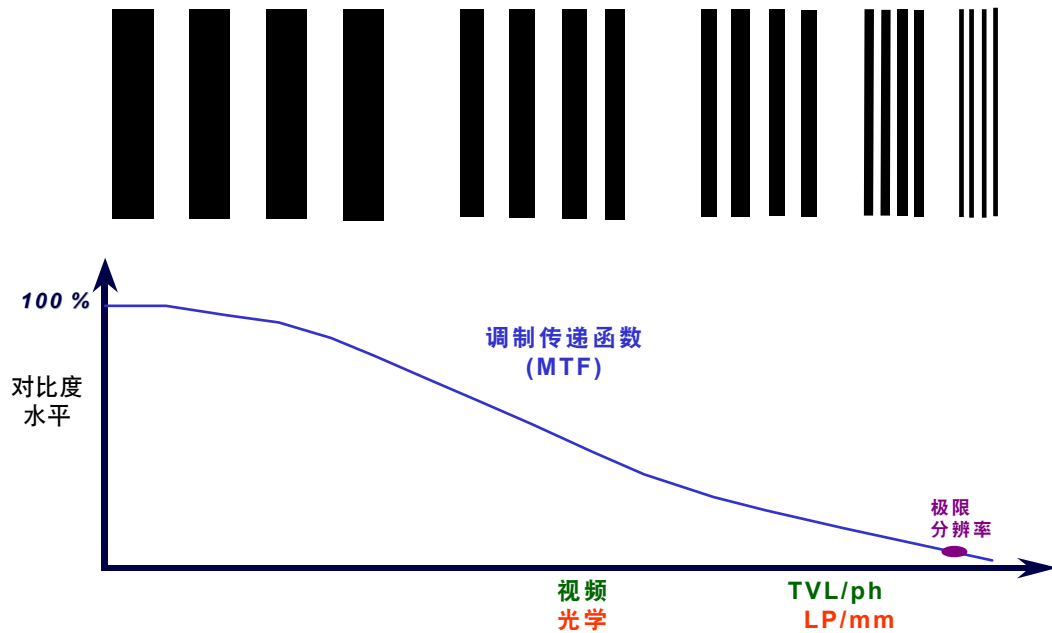


图 2 MTF 体现了图像对比度水平随通过成像系统的空间频率增加的变化特性

镜头-摄像机 MTF 和图像锐度之间的关系

文献[2]是成像科学领域有重大影响的著作之一。该著作的最重要成果在于揭示了任何远距离观看系统(如电视或电影)的可视图像锐度与系统 MTF 曲线下方区域的面积的平方成正比。其意义在于：在摄像机有用通带上的 MTF 曲线的形状对所感知到的图像锐度有至关重要的影响。实际上，这比极限分辨率规格更为重要。

给定高清摄像机系统的图像锐度最终由镜头 MTF 曲线形状和摄像机 MTF 曲线形状的乘积决定。低于 800 TVL/ph 的复合 MTF 曲线形状(在 200-600 TVL/ph 这个最重要的范围内)，实际上是镜头-摄像机系统可视图像锐度的最主要决定因素。在设计演播室镜头时必须考虑此因素，利用创新光学技术加强此空间频率范围的对比度效果，如下图 3 所示。

由于 MTF 决定空间频率的对比度水平，必须还要指出，镜头的固有光学对比度性能(镜头区分不同亮度水平的程度及其再现无任何光污染的真实黑色的能力)与镜头/摄像机图像总体锐度性能关系密切。

佳能高清镜头使用各种设计技术，制造了在关键频率范围上具有出色对比度和高 MTF 的镜头。包括基本的镜头镜片设计、用于实现设计的物理材料以及至关重要的用于每个镜头镜片的多层光学镀膜技术。

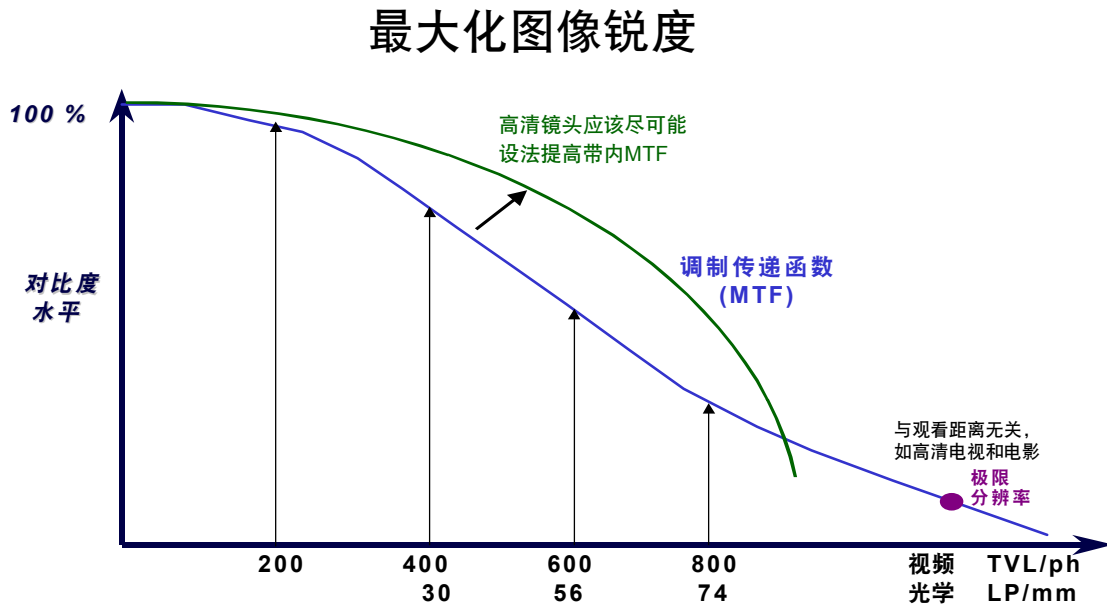


图 3 基本高清镜头-摄像机 MTF 曲线，强调高清镜头设计时在关键的 200-600 TVL/ph 范围内优化 MTF 的重要性。

1080 线和 720 线高清演播室摄像机一瞥

高清镜头并不区别不同的高清制作标准。这些标准都是高清标准，类似的 MTF 标准也都适用。图 4 显示了 1920(H)×1080(V)高清演播室摄像机与典型的高性能高清演播室镜头配合使用时的典型 MTF 曲线。以使用典型的高清镜头为例：现代的 1080 线高清摄像机规格通常在业内接受的 800 TVL/ph 参考空间频率上指定了 40-45%的调制深度范围(如下面图 3 所示)。但是，这些摄像机规格对于重要的 200、400 或 600 TVL/ph 空间频率上的调制深度却并不具参考意义。

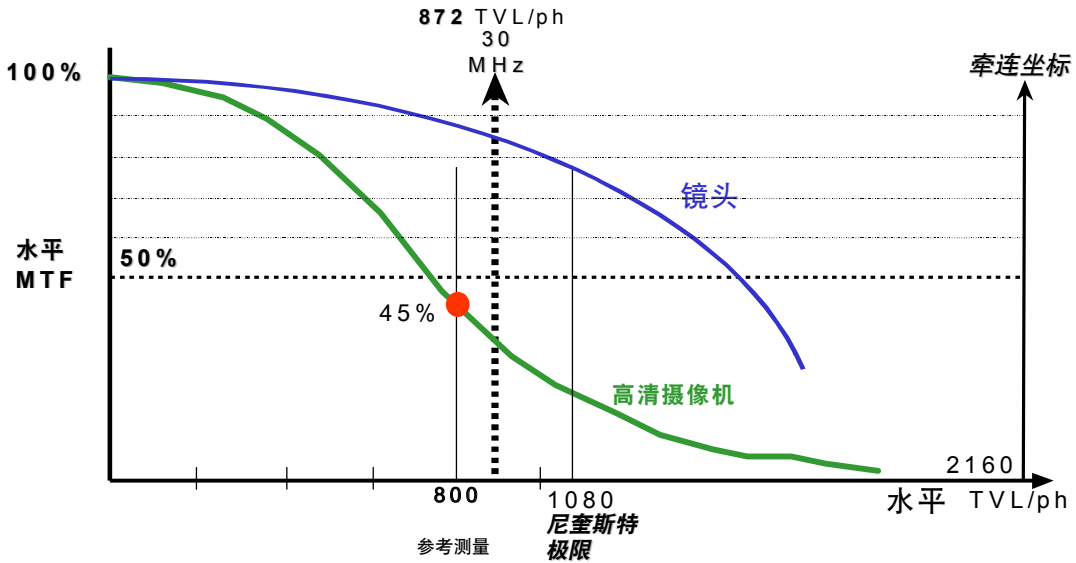


图 4 配备典型高清镜头的 1080 线高清摄像机图像中央测量的 MTF。通常，只发布参考空间频率 800 TVL/ph 处的规格。

720/60P 系统的情况更为出色，因为对于 60 场逐行帧采集的增强的瞬时分辨率进行空间分辨率的平衡，是该系统固有的特性。如图 5 所示，镜头 MTF 在高清系统的水平通带上非常高，这也是在 530 TVL/ph 参考空间频率(或视频领域中的 27.5 MHz)上能够实现典型 50% 调制深度的原因。因此，720 线 60P 系统具有优秀的主观图像锐度。

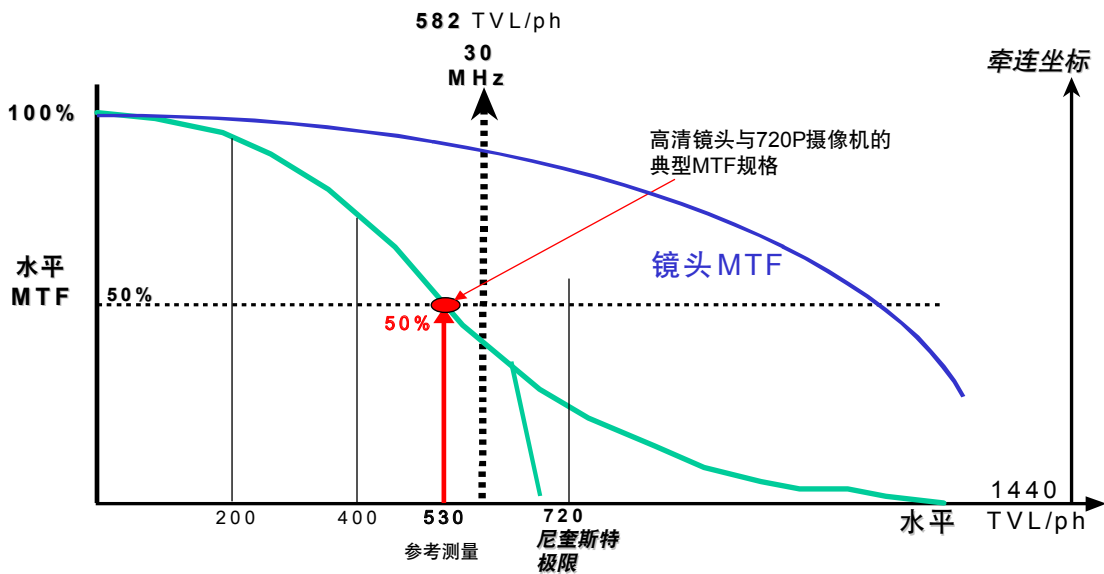


图 5 在配备典型高清镜头的 720 线@60P 高清摄像机图像中央测量的 MTF 只发布参考空间频率 530 TVL/ph 处的规格。

面对镜头 MTF 领域的现实问题

如果完全不采用相应的高清镜头，摄像机系统无法高效实现真正的图像性能。于是技术设计益发复杂。尽管高清摄像机分辨率性能在整个图像光栅上基本保持稳定(由图像传感器、光学低通滤镜及 A/D 转换器之前的电子过滤的空间采样不可逆转地决定)，然而在现代变焦镜头系统中由光学物理的特性决定其分辨率性能具有**强烈的变化性**。其变化性体现在以下三个方面：

1. 演播室镜头系统的光学设计约束、生产工艺容差、多个光学镜片连接的复杂性等限制导致 MTF 特性不能在整个图像光栅上保持稳定。MTF 从图像中央到四个边缘不可避免地下降。
2. 针对不同场景光线条件操作镜头光圈以调节光圈孔径大小,由此产生的 MTF 变化,是由衍射现象相关的光学物理的基本原理决定的。
3. 最重要的是,在变焦操作过程中镜头焦距的变化会进一步改变镜头的 MTF。

为了解决这些巨大的技术挑战，佳能的设计优化考虑了九个不同的空间参考点，这些点精确地定义在 16:9 像平面的中央、中间(四个点)和边缘(四个点)，如下图 6 所示。

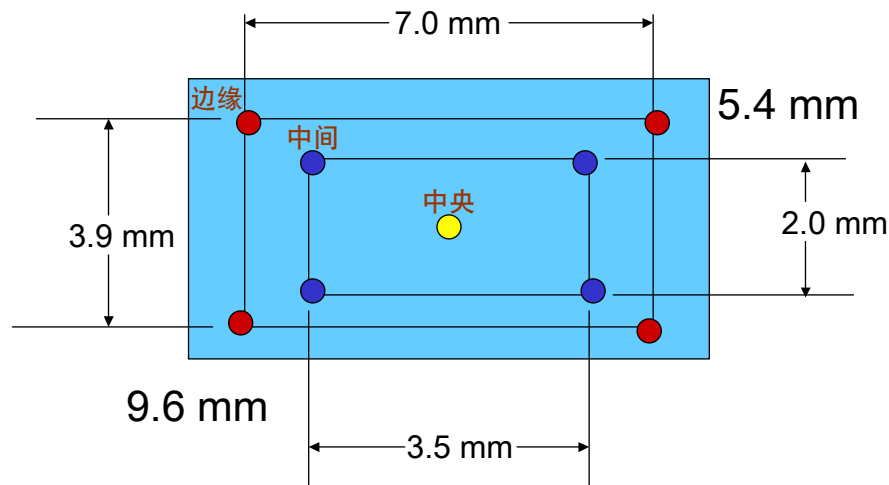


图 6 在设计阶段计算机优化搜索三个区域以实现出色的 MTF 分布

我们在演播室镜头设计中采用了强大的计算机优化程序，以便在全部九个点上都获得最高的整体 MTF，该镜头系统总共包括三十四光学镜片。由于设计优化必须要实现最高的 MTF，在调节镜头光圈来改变镜头系统光学孔径大小时，此任务益发复杂。而且，在变焦操作中，相对移动多个光学镜片的位置以改变镜头焦距时，还要进一步对系统进行优化。在此设计优化中，仅涉及的变量数目之巨，就足以令人惊诧。在这种情况下，只有进行全面的均衡才能实现最佳优化。最终，我们实现了相当出色的空间 MTF 性能(特别关注 200-600 TVL/ph 区域)，这是现代计算机辅助设计技术能力的证明。

对于所有镜头来说，无论是哪个制造商，这种 MTF 变化的特性都是不可回避的技术现实。此处谈及的多种光学物理约束对于这种普遍存在的光学现象都有重要影响。面对这样严峻的挑战，不同镜头制造商都研发了自己专有的设计优化方案。因此，每个镜头设计师所做的各种取舍必然存在系统性差异。*在高清镜头测试中应该对这些差异细加研究，然后才能作出购买决定。*

总结

在评估任何高清成像性能时，图像锐度问题都会突显出来。正如前面所强调的，镜头对锐度再现有着重要影响。镜头也预先决定着镜头-摄像机对比度性能，并在系统色彩还原方面起着重要作用。由于在高清演播室镜头光学系统中存在着大量的变化因素，当前价格下的镜头的总体高清性能反映了强大工程设计能力和出色的生产工艺容差控制水平。

参考文献

文献 1 "HDVS CCD Camera – A Significant Advance in Real-time High Definition Imaging"

L.Thorpe, Y.Morioka, S. Kurita, N.Kawada
NAB Proceedings 1992

文献 2 "Image quality – A Comparison of Photographic and Television Systems"

Otto H. Schade, Jnr.

SMPTE Journal, June 1987 Pages 567 – 595