

现在的RGB 4:4:4摄像机与可变帧速率摄像机也都是在这个图像平台上逐步发展而来的。

如今又出现了更大的35mm单图像传感器系统，它必将赢得广大创作人士的欢迎，尽管他们一直钟情于数十年来所使用的传感器画幅尺寸。由于更大的光学器件在整个高清通带具有更高的MTF特性，其图像锐度将高于2/3英寸画幅摄像机。当然，这种镜头也无法避免色差。但是，可能因为与三种胶片感光剂之间的相互影响实时显现，对这些色差的控制要求无论如何也不像2/3英寸镜头那样严格。在将色差降低到具有重要意义的新低水平方面，这种更大的画幅具有广阔的空间。

创作需求、制作预算及制作人的要求等因素，决定了在电影、高清电视制作及高清电视商业制作领域两种数字格式的相关应用。与基于广泛的电影胶片格式的旧商业模式相似，能够想象，新兴的三图像传感器和单图像传感器的数字电影体系在未来相当长的一段时间内将会并存发展。

Larry Thorpe为佳能美国广播器材产品部全国营销总监。

本文的缩略版本最早刊登于*Film & Digital Times* (《胶片和数字时代》) 2007年6月刊。

高清镜头的矛盾：

性能与成本脱节了吗？

作者：Larry Thorpe

摘要

随着整个行业向高清过渡的步伐逐渐加快，广播公司需要大量投资于高清演播室转换及高清ENG设备采购，所面临的压力日益增大。高清摄像机和录像机的成本在稳步下降，但相应的高清镜头却并非如此。本文介绍了制造可靠高清镜头所需的先进技术，并解释了其成本居高不下的原因。光学制造商长期以来所面临的一个困扰是，试图指定高清镜头的成像性能，但涉及的数据又极其繁杂，从而造成了至今尚无任何一家国际制造商发布此类规格的局面。令人遗憾的是，这导致了终端用户对高清镜头-摄像机投资中镜头真实成本的误解。本文旨在解释这一极为重要的问题。

前言

高清镜头价格昂贵，而且并不随高清摄像机和摄录一体机的价格同步下降(与光学制造商关系不大)。这个难以解决的问题一直使很多业内人士感到苦恼，他们在将演播室、移动电视设施及广播ENG系统过渡到高清系统的过程中面临着艰巨的财务困难。

令人头痛的常常是，一方面评估极其复杂的数字高清演播室摄像机需要耗费大量时间和精力，另一方面需要逐一评估高清ENG摄录一体机的全部复杂因素(要求采用全新非磁带格式和特别严格地审核工作流程的革命

性创新)。因此，选择相应的镜头被置于次要地位，以致最后一刻才做出决定——有时甚至被认为是电视台整体转换规划方案中不可避免的灾难。特别是在演播室高清镜头和各种ENG高清镜头的综合成本高涨时，上述矛盾使得选择镜头的工作更加困难。

行业内对此话题的广泛评论大概可以总结为两个关键问题：

- 1) 原因——高清镜头的成本为什么如此高昂？为什么成本不能像当代高清摄像机与摄录一体机一样稳步下降？
- 2) 性能——高清镜头的性能真的值得花这样高的成本吗？

本文的目的就是要解决这两个问题，并尝试说明镜头——特别是高清镜头，绝对是实现“高清”全部美好展望的主要决定因素，因此对高清镜头的投资有着非常重要的创作和技术意义。

矛盾的核心

当代高清摄像机手册充满了关于图像传感器技术(空间传感器数量、传输机制等)、A/D转换器位深度、DSP位计算以及大量通过当今强大的数字处理实现的图像参数调整的描述。尽管详细性能规格有些不足，但高清摄像机手册中提供的技术要点一般足以让您了解特定摄像机可以实现的总体性能。

然而，镜头手册中却普遍回避影响图像性能的技术细节(无论哪个光学制造商)。但镜头操作方面的规格参数，如视场角、焦距、最小摄距等，却都有详细的描述。当然，这些规格对选择适合各种拍摄环境的恰当镜头也非常重要，以便应对不同的演播室、体育场馆或多种外景拍摄的挑战。已发布光学性能规格的空白是个遗留问题，原因是在每次设置焦距、镜头光圈及对场景中不同对象重新聚焦时，全部成像属性都会改变，故而难以充分描述这些成像属性，为了避免由此引发的复杂性而没有发布相应的规格。为了描述这些参数间的相互影响，所需的数据量极其庞大，难以以易于理解的形式整合出来。然而，必须承认，由于缺少这些镜头规格，致使用户更容易相信镜头的性能并不如与其搭配的高清摄像机性能重要。

对高清镜头性能与相关成本的重要讨论最终归结为几个核心问题：

- 1) 普遍认识的高清镜头价值。许多人错误地认为，镜头对于当代数字高清摄像机的成像质量的重要作用并不那么确定。由于缺少镜头性能规格，人们普遍认为不同制造商生产的同类镜头的性能基本没有什么差别。因此，一种常见的观点是，价格是影响镜头选择的唯一因素。
- 2) 高清镜头的设计与制造。与固态传感器、摄像机处理的数字DSP以及当代ENG摄录一体机数字记录系统采用的所有新奇复杂的功能不同，许多高清镜头自身的技术并不为人所知。



HJ22ex7.6B
小型便携式
EFP镜头



XJ23x7.0B
大型演播室
箱式镜头

进一步的矛盾—— 在演播室中选择高清演播室镜头 还是高清便携式EFP/ENG镜头？

从已发布的严格的操作规格上比较，便携式EFP/ENG镜头和大型演播室箱式镜头非常相似，这使选择更为复杂。例如，以佳能镜头为例，许多打算在高清新闻演播室使用高性能便携式高清摄像机的终端用户，都希望寻找合适的高清镜头，但是他们发现两种镜头只有微小的区别(根据各自手册中发布的操作规格)：然而，其价差却几乎接近2:1。既然如此，是不是在便携式高清演播室摄像机上

采用低成本的便携式高清镜头更为明智？答案实际上是“绝不”——这个立场让我们一下子又陷入技术讨论的漩涡。

说明整个16:9图像平面上多种镜头成像参数的性能，需要大量的技术数据，为了简化说明，下表总结了其中较为主要的属性。表中对高清演播室箱式镜头与便携式高清镜头的相关性能进行了简单的比较。

孤立比较任意单个规格间的差异可能会引起争议，但所有规格综合在一起，就可以从整体的清晰度和锐度方面明确区分两种类型的镜头。此外，在演播室创作中聚焦呼吸效应也是一项重要的创作考虑因素。当然，高清镜头手册中的操作规格不可避免地会引发终端用户的担心，觉得镜头可能不适于特定风格节目的拍摄。手册中并未提到两种镜头间可能的成像性能差异。而且，这才是问题的核心所在。

| 图像性能属性 | 高清演播室镜头 | 高清EFP/ENG镜头 |
|--------------------------------|---------|-------------------------|
| 1. 灵敏度 | 非常高 | 高 |
| 2. 图像锐度 (图像中心) | 非常高 | 高 |
| 3. 图像锐度 (图像边缘) | 高 | 适度高 |
| 4. 相对光线分布 (亮度在图像平面上分布的均匀程度) | 非常好 | 适中 |
| 5. 黑色再现 | 优秀 | 非常好 |
| 6. 对比度 | 超高 | 高 |
| 7. 色差 | 严格控制 | 控制 |
| 8. 单色像差 | 严格控制 | 控制 |
| 9. 几何失真 | 非常小 | 适中 |
| 10. 聚焦呼吸效应 (调节焦距时视场角变化) | 接近于零 | 高 (ENG镜头) 适中 (EFP镜头) |

表1 总结了直接影响高清镜头总体成像性能的主要光学属性。

重新强调高清镜头的真正作用

从发展过程来看，在活动转播车、演播室及ENG采集中，电视摄像机一直占据主导地位。当今行业对于数字影像的强烈关注引发了一种观点，认为镜头的作用仅仅是“准备”光学图像，然后由当代数字摄像机进行“成像”，最后记录在数字媒介上。

但是，实际上更为准确的看法应该是镜头在生成所需图像的过程中具有首要作用。而相应的摄像机的技术要求是首先在光电模拟转换中忠实再现生成的图像，然后转换成数字信号，最终进行数字记录，力图忠实采集摄像机数字再现的图像。人们通常认为镜头的作用是次要的，这大概与电视摄像机更引人注目的发展过程有关，经过数十年努力的技术研发实现了目前惊人的性能表现——当然是在标清领域，而在高清领域成就更为卓著。许多不同的技术进步对此有积极贡献。

多年来，全球的摄像机制造商在逐渐取得技术突破的过程中发布了大量的技术论文。然而，光学制造商在此期间却很少发布相应的技术论文。只有先明确地理解高清镜头-摄像机成像系统中光学器材的核心作用，才能合理地评估高清镜头的价值(在性能规格与价格方面)。这可以从作为高清系统实际的“成像守门人”的小光学图像的分析入手。此图像既出现在镜头的出口处，也同时出现在镜头前端的采集过程中。无论摄像机如何先进，都不能输出比这个小图像质量更好的图像。

2/3英寸高清画幅

当二十世纪九十年代早期整个行业决定从当时成熟的一英寸高清画幅

尺寸转向较小的2/3英寸画幅时，就将光学设计和制造技术推到了物理极限。这项重要决定的目的是要在当时成熟的实际制作领域中实现高清格式，包括高清摄录一体机、移动便携式高清摄像机、POV及其他袖珍“箱式”高清摄像机等。另一个目的是还要在电视领域实现前所未有的成就，即建立保证镜头-摄像机互换的全面灵活性的标准——使所有2/3英寸高清镜头(任何制造商)都可以与任

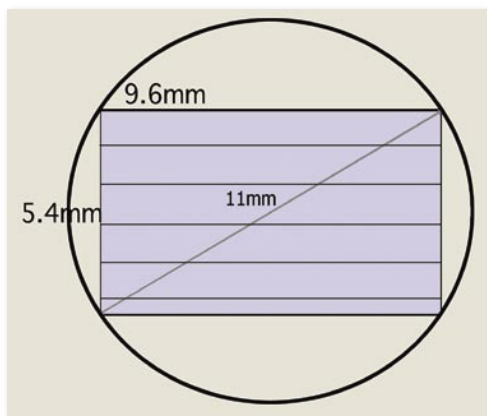


图1 镜头投射在摄像机图像传感器上的2/3英寸光学图像平面(垂直方向按毫米刻度分成几个部分)。



图2 显示了将球场和体育场的大部分区域包围在16:9高清图像平面内的典型高清镜头布置方案——场景中包含丰富的图像信息。

意2/3英寸高清摄像机(任何现有制造商)互换。经过了四年时间，全球各大制造商统一了意见。这项标准的出台非常及时，到二十世纪九十年代中期，高清技术终于可以对高清摄录一体机设计实现全面支持。但是，就实现所需的高清性能而言，这项标准又使所有光学制造商必须重起炉灶。

图1显示了从2/3英寸高清镜头出口处射出高清光学图像的16:9图像平面。从尺寸上看，这是个很小的图像。但是，此图像却是所有影响高清图像性能因素中不可或缺的决定性因素。它是名副其实的高清系统“性能守门人”。

镜头作为场景与高清显示器之间的“成像守门人”

在摄像机发挥作用之前，高清镜头必须对从三维现实世界的场景中所选的样本进行大量转换，使其成为很小的对角线长为11mm的二维光学图像。图像缩小的程度可以从图2看

出——图中显示了镜头在其光学入口处可以看到所需的体育赛场(适当的大视场角镜头设置)的16:9拍摄采样。请注意,该镜头所输出的光学图像大约只有拇指指甲大小!

这种转换在镜头中非常常见,因此其重要作用经常被忽视。但是,其作用不应该那么轻易地被忽视,特别在高清电视中。该小图像中隐藏着特定镜头不可磨灭的“印迹”——构成了所有影响图像总体光学质量的不同属性的集合,每个属性都必须由摄像机转换为数字信号。其中包括黑色再现、图像锐度、色彩还原、色调再现(灰度)、对比度、动态范围(曝光宽容度)以及某些高光处理特性。镜头-摄像机系统的灵敏度也主要由镜头决定。

现代高清摄像机的数字操作“手柄”允许在创作中单独改变这些图像属性。但是,每一个镜头性能参数的重要特性无法通过高清摄像机来提升。这非常有助于理解为什么在终端大屏幕家用高清显示器上,这个小镜头图像在其显示的画面上最终能被放大数百倍。

“高清”的光学含义

首先,通过分析标清(SDTV) 2/3英寸镜头和高清(HDTV) 2/3英寸镜头分辨率要求的本质差异,就可以了解高清镜头设计中的光学难题以及相关成本。光学清晰度是以“每毫米线对”(Lp/mm)来描述,包括水平和垂直方向的清晰度。这类似于分别表示电视摄像机本身水平和垂直分辨率的“每画幅线”(TVL/ph)——与这些视频规格不同的是,“光学每毫米线对”不受视频扫描参数影响。

在最高的对比度下,标清镜头必须在水平方向上达到32LP/mm,才有可能满足数字标清摄像机具有指定的5.75MHz亮度带宽的电子能力要求。高对比度是保证镜头-摄像机系统中

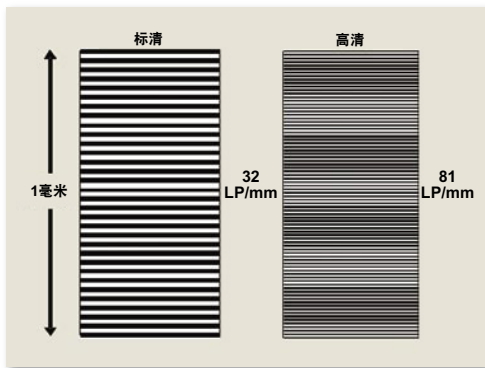


图3 以图示说明标清镜头与高清镜头每毫米线对规格的差异(高清镜头高出标清镜头2.7倍)。

所需图像锐度的首要因素。越过标清镜头MTF特性的边界之外,就没有什么需要考虑了(无法记录)。另一方面,高清镜头必须达到81LP/mm的最高对比度,才有可能满足数字高清摄像机具有指定的30MHz亮度带宽的更高的电子能力要求。从图3中可以看出两种镜头的差别,图中并列比较了标清与高清镜头的一毫米厚的“薄片”。请注意,小小的一毫米会造成多大的差异。

通常令人头痛的一点是,必须要保证单个光学镜片通过81Lp/mm,使其具有高对比度分离的黑白线条。判断单个镜片(或复杂的多镜片镜头系统)传输高对比度精细细节的能力,有两个主要因素:

- 1) 衍射——与光的波动性相关的现象,会严重限制所有镜头的分辨率。
- 2) 散焦像差——所有透明材料固有的各种单色像差,受波长影响的色差除外。

这些纯粹的物理问题十分棘手。广播电视所需的多镜片镜头(数十个镜片)极大地增加了设计和制造的难度。

为了实现高清成像,各镜头镜片的物理完美程度也具有特殊意义,包括表面不规则度(与完美设计轮廓的微小偏差)以及表面质量(光学界定义为划痕与凹坑)。必须将这些问题减少到极低的水平,以确保镜片在实现更高空间频率的高对比度传输时所必需的特性。这就需要长期的高成本制造过程。

镜头成本因素: 实现镜头分辨率的高昂代价

大自然对各种透明材料的物理属性的影响不尽相同。当光束必须通过有物理限制的光圈时,光的波动性会造成衍射现象。在光圈逐渐缩小的过程中,镜头的最大分辨能力将按照图4蓝色曲线所示的趋势逐渐降低。对

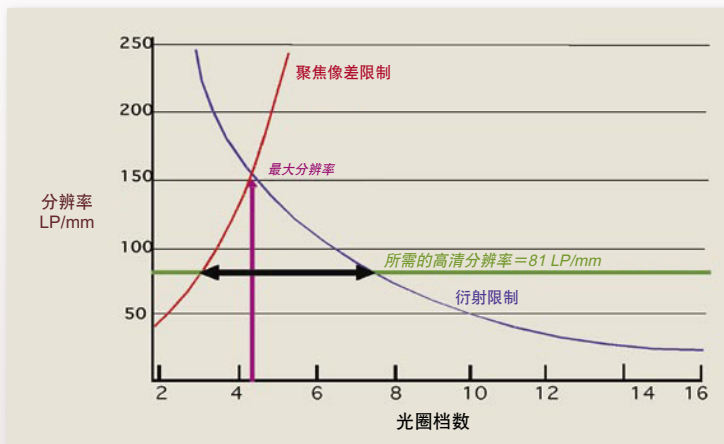


图4 显示决定典型高清镜头系统分辨率的两个限制因素——即镜头光圈减小时的衍射效应及镜头光圈接近广角端时的散焦像差。

于特定的画幅尺寸，几乎没有任何方法能够克服这种基本的物理限制。附带说明一下，画幅尺寸越小，衍射限制越大(例如，对于1/2英寸与1/3英寸画幅，蓝色衍射曲线逐渐下降)。

镜头系统还受到每个镜片固有的众多散焦像差的综合影响。球面像差、像散、彗形像差与像场弯曲是作用于单一光线波长的四种像差(这就是称为单色像差的原因)。但是，高清图像与构成彩色图像的光线波长的频带有关，且附带的色差都受波长影响。因此，纵向色差和横向色差会共同作用，进一步降低亮度分辨率，同时还会造成不必要的镶边现象。如图4红色曲线所示，这些色差对给定高清镜头可实现的分辨率水平共同构成了第二种限制——此时镜头光圈已打开。

因为这些像差是每个镜片固有的，所以光学设计师很早就已掌握通过镜片组合来巧妙抵消这种像差。每种镜头组合(通常使用不同的昂贵玻璃材料)与精心设计的镜片表面轮廓共同作用，可以在一定程度上抵消这些像差。最小化所有这些像差累积的散焦影响是任何镜头设计周期中的主要工作。与衍射不同，在镜头光圈接近全开时，这些像差会使分辨率越来越低。

由于存在两个分辨率限制因素，光学设计师的目标是在尽可能大的光圈档数范围内保证高清必需的81Lp/mm上限(尽可能具有更大的提升空间)。因此设计策略的核心是使图4红色曲线向左移动，从而使得镜头设计演化为一场昂贵的战斗。在实现此目标的过程中没有任何捷径。

在高清演播室镜头设计中，设计

师会利用所有的设计资源将红色曲线尽可能移向左侧。这需要在关键镜片中采用成本高昂的光学材料，并采用更多的镜片，从而获得更大的自由度来减少像差。保证多个镜片(现代高清演播室镜头有高达35个镜片)精确对准的光学机械设计也日益复杂。结果，造成演播室箱式镜头的整体尺寸和重量大幅度增加。但是，由于性能是设计的核心要求，物理限制成为次要考虑因素。采用的材料和制造过程也导致成本的迅速高涨。

对于大变焦比外摄镜头(当代镜头的变焦范围都是60:1到100:1)，单是其焦距范围之大，控制穿过整个图像平面光线特性之复杂，就使得优化镜头MTF的任务更加困难。这类镜头是所有镜头中成本最昂贵的。

对于便携式高清ENG镜头也是一样。在这种情况下，尺寸和重量是主要设计目标，同时要求镜头成本与相应的高清摄录一体机合理匹配。光学

设计师必须在这种相当苛刻的限制下尽可能实现最佳的质量。此时需要采取一些权宜之计，包括使用更小的镜片、更少的镜片数量以及普通防反射镀膜等。

镜头成本因素： 高清镜头设计的多方面因素

镜头设计师采用了多种玻璃材料，利用这些材料精确加工多个镜片的形状，对每个镜片进行多层镀膜，并将所有镜片安装在高度精密的光学机械结构中，然后实施严密精细的对准过程，以便在所有镜头设置下实现所需的光学操作功能和最佳的图像性能。前者需要对焦距(变焦范围以mm表示)、视场角(以度表示)、最小摄距(以mm表示)及光圈范围(以F值表示)进行必要的控制。后者要求最大化所需的技术性能参数(灵敏度、锐度、对比度、光谱透射率、相对光线分布等)，同时还要最小化地球上

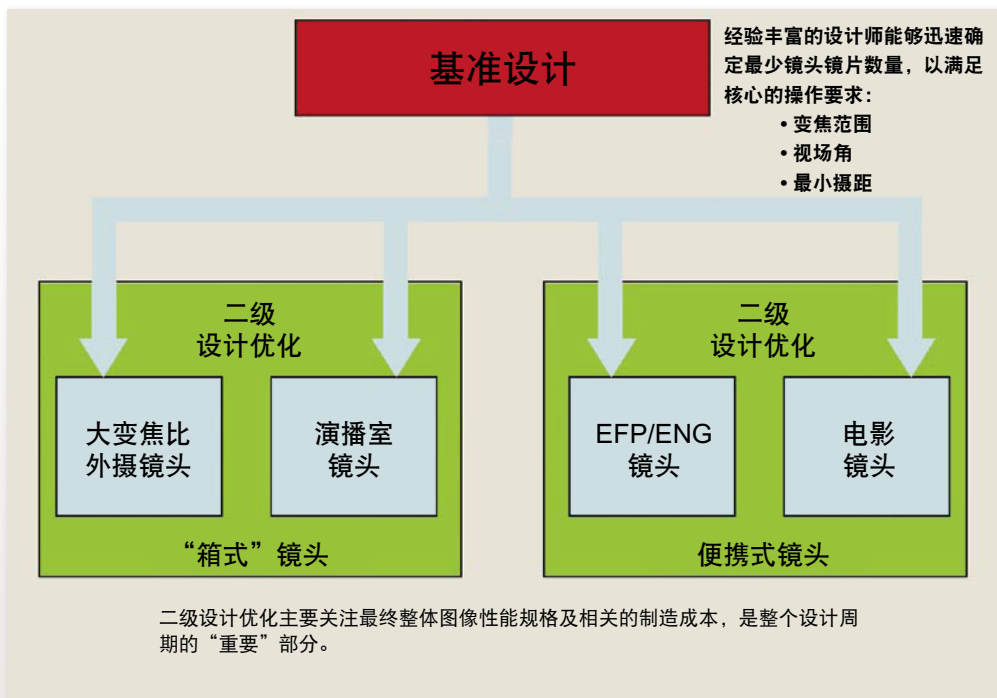


图5 正是在二级设计优化中，造就了各种类别镜头的本质差异，确定了其各自不同的性能规格。

任何透明材料都无法摆脱的多种光学像差。光学设计的本质正在于此，随之而来的是成本高昂的制造过程。

优秀的镜头设计可容易地确定实现要求的变焦范围和视场角所需的最少镜片数量及每个镜片的形状。在这之后，才开始设计中真正重要的部分——简单表示为图5所示的“二级设计优化”。在这个设计过程中，必不可少的是控制极为复杂的性能规格。大部分的精力用于优化镜头的总体MTF特性。

首先，要在穿过多个玻璃镜片后实现在81Lp/mm空间频率上所需的高对比度，必须特别注意选择合适的玻璃材料(全球各大专业厂商提供了数百种材料可供选择)。要在整个16:9图像平面上保持对比度水平，必须极其严格地保证高精度完成材料的切割、研磨、抛光。光学镜片具有无法改变的物理特点。只有当每个镜片的表面偏差、表面质量与光学镀膜都符合极为严格的规格时，才能实现所需的最终性能。这需要大量的时间反复进行研磨、抛光和精密的检验。而且，这种整体处理也是一个成本高昂的过程。根本没有什么办法可以规避这些重要的设计步骤和相关的制造过程。与标清镜头相比，高清镜头的表面公差需要严格控制，其精度为标清镜头的8-10倍，以确保实现最高空间频率所需的特性。

镜头成本因素： 光学镀膜关键而广泛的作用

物理原理决定了光线从各玻璃镜片到空气表面传输时会产生4%左右的损耗。20个或更多的镜片会将透射率迅速减小到只剩下原来的几成

左右。光学镀膜(采用全新金属及其他材料)可以显著降低这些损耗。

特别选择的具有特定折射率的薄膜材料以1/4光线波长的厚度镀在镜片表面上。这些镀膜产生了额外的反射，从而抵消光线原来的反射，使通过镜片的透射率恢复到接近100%。

由于镜头必须透射整个可见光范围(大约400到700nm)的光线，光学设计师采用多层镀膜并控制两个变量——镀膜采用的特殊材料及其各自厚度，来实现这一目标。所使用的确切材料及其附着特性都是各制造商设计工具包中的专利秘密。镀膜工艺需要采用精密计算机控制的尖端设备。镜头防反射镀膜工艺是一个特别耗时而且成本高昂的过程，在高性能高清镜头的总体成本中占很大比例。

除了显著提高多镜片镜头的透射率外，防反射镀膜还有助于控制引起眩光与杂光的内部反射。在容纳一组光学镜片的机械机身内所实现的各种物理创新也有助于这方面的改善。

镜头成本因素： 高度复杂的光学机械结构

镜头的物理结构常常被人忽视，不论是大型演播室箱式镜头，还是便携式EFP/ENG镜头。实际上，光学机械设计科学基本上是独立发展的，在电视领域内并不为人所知。然而，各大镜头制造商还是在这方面进行大量的投入。很多人都认为望远镜是一

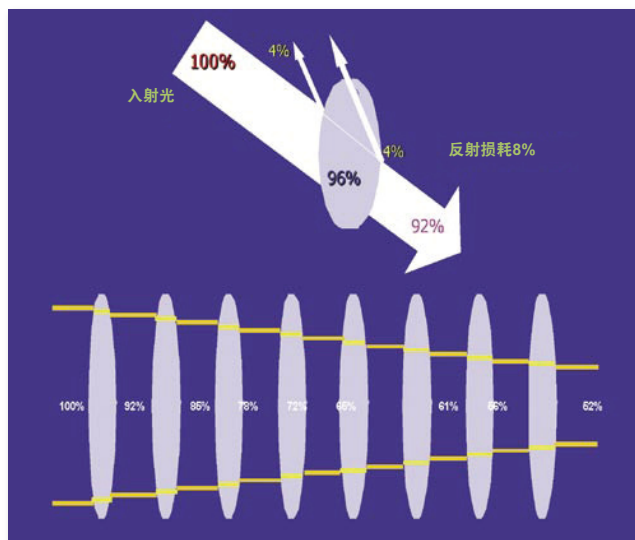


图6 单个镜头镜片在空气与玻璃表面的反射率约为4%。这将大幅降低多镜片镜头的总体透射率——图中显示了8个镜片的镜头其总体透射率只有52%。

种精密的仪器。实际上，高清镜头也是一种非常精密的仪器，而正是光学机械设计保证了其优秀的物理完整性。在优质广播级镜头中还采用了镁金属材料。

光学设计师设定的高标准必须转换成实际的光学产品。高清镜头中的每个玻璃镜片都对最终整体光学系统性能有重要影响。设计师花费数月时间使用超级计算机对光学镜片组的各个方面进行优化——包括所使用的各种玻璃材料、每个表面的轮廓、此种表面的数量及其光学镀膜等。现在，只有实际实施设计才能完全实现设计师的性能目标。在工程设计中必须考虑到必要的组装和对准精度。

只要各个镜片标称位置和空间方向符合公差要求，高清镜头系统就可满足其设计目标而正常工作。机械结构必须能保证相互连接的光学镜片的光学系统完整性。因此，镜头的设计需要光学工程师、机械工程师和电子工程师紧密合作。光学设计师与机械设计师形成一个紧密的设计团队。制

造这种镜头需要制造、系统组装、光学对准以及光学测试等各部门专业人员的密切合作。

在组装多镜片镜头过程中，即使微小的偏差也会导致某种程度的图像质量问题。进行变焦控制操作时，会使各镜片组进行不同的、精度极高的运动。两个镜片组之间的机械底座通过特殊的导槽控制以便完成相对运动。必须保证在精密切割的导槽中控制运动的滚轴在整个变焦范围内受到的物理阻尼是一致的。经过多年独创性的机械设计研究，并使用特殊材料，终于将运动相关的磨损降到最低。

总结

现代的高清镜头是集独特技术与优雅形体于一身的产品。无论从哪种意义上说，它都是一种精密的仪器。它能将丰富的高对比度细节信息提供给摄像机图像传感器，是实现高清的

非常重要的基础。考虑到小尺寸2/3英寸画幅所面临的各种挑战，过去十年来在高清镜头设计中所取得的成果是非常了不起的。但是，取得这些成果的代价却是高昂的成本。数字摄像机和录像机在微电路技术巨大威力的推动下也在不断发展。

摩尔定律、数字处理技术的魔力、不断提升的速度、持续进步的压缩算法等，所有这些因素综合在一起不断促使成本下降和性能提高。而与此不同，镜头的发展还是受玻璃材料、不变的物理定律和制造中的纳米级公差等因素限制。

这表明，如果我们能更好理解高清镜头对镜头-摄像机高清图像源最终性能的决定性作用，就会更深刻地理解镜头极高的内在价值。制造商希望制造广大用户财力所及的高清镜头，并且正在向此目标发起冲击。但目前为止，正如本文所述，我们只能达到现在的水平。随着50英寸高清

屏幕在众多家庭客厅中的逐渐普及，超过100英寸的屏幕也已出现在市场上(至少有三家制造商生产)，镜头在整体高清系统中作为“成像守门人”的作用在未来高清电视的长期发展中也将逐步提高。 ■

Larry Thorpe为佳能美国广播器材产品部全国营销总监。

“高清镜头的矛盾：性能与成本脱节了吗？”是为2007年4月的“Iowa DTV研探会”而准备。