

一种用于数字电影拍摄的新型高清电影变焦镜头

作者：Ken Ito、Laurence Thorpe



Ken Ito



Laurence Thorpe

数字电影制作正在蓬勃发展。在新的创作灵活性、不断强化制作流程的要求以及各种快速发展的技术等各方面因素的共同推动下，数字节目制作的发展势头显然强劲十足。高清(HD)制作中的2/3英寸画幅尺寸已实现全球标准化，为推动符合该画幅尺寸的高清摄像机及相应高清镜头的技术发展注入了强劲动力。与此同时，长期应用的更大尺寸的35mm画幅的独立发展，也有望将数字电影制作提升到更高的性能水平。

当前的便携式高清(HD)镜头正在如火如荼地发展，可满足日益扩大的主流2/3英寸画幅的广泛制作需求。电视节目的电子现场制作(EFP)、电子新闻采集(ENG)和电影(数字影视制作、黄金时间电视节目及电视广告制作)，都在推动着独立的便携式镜头设计标准的发展，以最好地满足许多不同应用领域的创作需求。这些标准包括图像性能、操作设施、人体工程学及必要物理条件等方面的内容——都要适应各自不同的应用要求。

本文将介绍这些设计标准，它们适用于针对目前日益普及的数字24P高清摄像机(图1)所设计的新型5.5mm至44mm T2.1 2/3英寸电影变焦镜头。在这种第三代电影镜头设计中，体现了很多杰出电影摄影师(DoP)的意见和建议。本文将介绍重要的技术要求和力图支持摄影师建议的相关独特解决方案。



图1. 新型5.5至44mm T2.1电影变焦镜头。

简介

数字电影制作正在迅速发展出多种分支,包括影视制作、黄金时间电视节目制作、电视广告制作、记录片制作、独立制片(在其所有表现形式中)以及多种企业、商业和工业应用。这种拓展又促进了多种相关数字采集、编辑和后期制作产品的繁荣。更为可喜的是,市场上涌现出大量与数字电影制作相关的光学产品,如电影定焦镜头、电影变焦镜头、EFP摄像镜头、光学宽银幕格式转换器以及大量的相关光学滤镜和附件等。本文将介绍专门用于高端2/3英寸画幅数字电影制作的新型数字电影变焦镜头的技术背景。

数字电影的画幅尺寸

在2000年,随着首款24帧数字高清系统的出现,数字电影一炮打响,成为一种取代胶片电影的制作方式。这种高清系统基于2/3英寸的宽屏幕16:9画幅和国际上标准的1920×1080数字高清制作标准。高清标准所支持的摄像机和摄录一体机采用3CCD(电荷耦合器件)成像系统,历史上曾经出现过各种各样的低成本数字24帧系统——包括作为候补的高清1280×720标准、4:2:2标清720×480系统以及4:1:1标清720×480系统等。在几年之内,支持所有24帧/秒逐行扫描电视(24P)采集系统的2/3英寸系列镜头迅速扩充。请注意,如果将2/3英寸画幅转化为一个直径16.93mm的圆,实际的16:9画幅位于此圆的中部且对角线长为11mm。这类镜头中包括高性能便携式电子现场制作(EFP)镜头和更能体现电影摄影师的希望和诉求的电影镜头。

大画幅系统

去年,我们推出了更高水平的数字24P采集系

统,该系统以35mm画幅数字摄像机为原型开发,并采用了针对不同画幅(根据SMPTE 59标准中单独规定的35mm类型)独立设计的单个传感器(CCD和CMOS)。这种新一代数字系统的意义在于,提高了传感器空间采样能力,加上大画幅镜头本身具有更高的调制传递函数(MTF),从而能实现更高的总体图像锐度。其中还有一个明显的优势,就是人们对长期应用的35mm光学画幅非常熟悉,而且有机会继续使用目前全球存有量极大的35mm胶片电影镜头。单单是新兴数字制作市场的规模、各种不同预算要求及创作目标,就可保证各种画幅尺寸在数字电影的长期发展过程中共同繁荣。

2/3英寸画幅是主流数字电影格式

尽管新兴的35mm画幅数字电影系统对高端制作领域(重要电影、高端广告及某些电视剧)越来越具吸引力,业界还是希望数字电影制作继续以高清2/3英寸画幅为主。这有以下几方面的原因。首先,这种国际化的画幅在全世界具有广泛的基础。其次,2/3英寸高清和标清镜头当前全球存有量仍然十分巨大,而且日益增强的设计能力推动其继续发展。第三,多种集成摄录一体机的小型化持续发展。这些因素综合在一起,使2/3英寸画幅在各种画幅中占据主流地位。还有一条,可能是最重要的原因,即这种画幅背后的巨大竞争压力促使24P摄像机和摄录一体机的成本稳步下降。

电影变焦镜头

EFP镜头与电影镜头在数字电影制作领域共存

传统电视制作人、导演、摄影师(习惯于视频

制作)和传统演播室制作人、导演、摄影师(以拍摄胶片电影为主),还有大量的自由摄像师及摄影师,都在数字电影制作中获得了丰富的经验。进而,他们共同带动了全球对EFP镜头和电影镜头(及相关附件)进行广泛的研发。从镜头制造商的角度来看,这两种镜头同样重要,都需要开发一系列相关镜头。这些镜头体现了各种不同的制作需求(光学与人体工程学方面)、完全不同的制作预算及多种创作目标。因此,两类镜头的新系统设计要齐头并进。

前面提到,习惯于胶片电影拍摄的广大业内人士在采用数字电影制作的过程中,应该尊重长期形成的行业实践与技巧。特别是使用单台摄像机拍摄电视剧、电影及电视广告时,摄影棚及现场拍摄的技术、制作流程与独立的电视拍摄方法完全不同。电影镜头正是这种差异的核心,它能够真实体现摄影师、灯光人员和监制人之间的密切合作。

在1996年,我们推出了一款5.2mm至47mm的2/3英寸变焦电影镜头。随后在2001年,又推出全新系列的高清2/3英寸电影镜头,包括五支定焦镜头和两支变焦镜头(一支为4.7mm至52mm的广角镜头,另一支为变焦范围从7.5mm至158mm的长焦镜头)。这些镜头用于多种24P高清数字采集系统,遍及各种制作领域。来自各方面的意见、批评和建议鞭策我们展开了一项新的开发计划,于2004年开发一系列全新的第二代定焦镜头(含有从5mm至55mm的六支不同镜头)以及相应的全新电影变焦镜头。后者是该系列中新增的5.5mm至44mm电影变焦镜头,

体现了创新的设计理念。

新型高清电影镜头的基本设计

我们原本准备在现有的两支电影变焦镜头(4.7mm至52mm的广角镜头和7.5mm至158mm的长焦镜头)中选择新镜头的基本光学操作属性。摄影师们建议开发另一种电影镜头系统,其变焦能力应该适中,广角能力应该强大,并具有能与新系列的电影定焦镜头抗衡的出色光学性能,这样对胶片摄影师会更有吸引力。与前两种变焦电影镜头相比,这种新镜头的设计更为独特。

具体的性能目标

新镜头整体性能更注重直接影响图像质量的重要光学属性:对比度、光谱透射率及图像锐度,同时也要设法降低光学失真的影响,这是任何光学设计都不可避免的任务。主要的光学失真包括与焦距相关的像差(如球面像差、彗形像差和色差)、几何失真以及相对光线分布等。在这些设计目标中,最大的困难在于如何量化电影摄影师特别关注的图像锐度和色彩还原属性。

当代镜头镜片的加工和抛光公差极为严格,这就赋予了现代镜头设计师在特定镜头系统中采用更多镜片的能力,从而使其具有更大的自由度以有效实现多个设计参数。这种优势在新镜头设

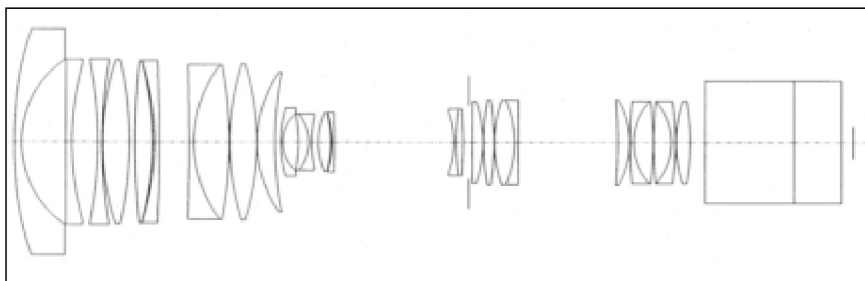


图2. 由二十多个光学镜片构成的新型5.5至44mm T2.1电影变焦镜头的截面图。

计中得到了充分发挥。图2说明了所使用的镜片数量。

图像分辨率与图像锐度问题

在电视与电影界人士长期争论的图像问题中，图像锐度话题一直最受关注。这不足为奇。长期以来，35mm胶片无疑是高分辨率图像的统治标准，并具有优秀图像质量的其他关键属性，如优秀的色调再现和色彩还原能力。这种长期确立的优秀参考标准必然成为任何用于电影制作的高清数字系统要达到的目标。要达到这种标准，必须同时改进高清镜头和高清摄像机的性能。

电视分辨率

在电视领域经常谈到分辨率一词(可进一步将其分解为水平和垂直分辨率的单独研究)，而在电影界则长期使用图像锐度这一术语。在描述分辨率二维表现的整体性时，后者更为贴切。它还可以有效地推测距电影院荧幕或家庭电视机一定距离之外的观众的心理视觉模拟效果。

在特定图像的细节信息中存在各种非常不同的属性，这决定了在电影院剧场环境或家庭娱乐电视的特定距离处观看的效果。这种形式的观看与对计算机屏幕的仔细检查或对卫星拍摄照片的搜索查看完全不同。在任何特定的观看距离处，人的眼脑系统只能分辨相当有限水平的细节。科学界使用术语“视力”来定义人的视觉能力。普通人可以分辨大约1弧分的角所对的物体。视距比定义了给定屏幕高度和观看者与屏幕之间距离的比。

在电视领域，空间分辨率正式定义为可以辨别的交替黑白线条的最大数量，其水平宽度等于图像高度，黑白线条都要计算。分辨率称为“每

画幅线”(TVL/ph)。适用于水平分辨率和垂直分辨率。在光学术语中，空间分辨率用于定义每毫米的周期数或每毫米线对数(Lp/mm)。

光学分辨率

光学图像中细节再现的准确度由理论输入点图像再现的密度和直径决定。在实际中，场景中一个很小的亮点在通过一个玻璃镜片后产生一定程度的模糊，出现一个明亮的中心，其四周被沿径向逐渐变暗的光斑包围。某些光学像差会加深这种影响。众所周知的球面像差(由塞德尔于1856年通过数学计算预测)就会产生一个周围有模糊光斑的点图像。彗形像差(也是由塞德尔预测)在亮点图像周围形成的光斑更大，但同时还明显带有一个指向内或指向外的彗尾。这些像差会严重影响图像的细节部分，达到一定程度时就会显著降低整体图像质量。这种影响称为图像不清晰度。正如本文所述，传统上视为成像的限制因素，如今却变成新的创作优势。

镜头对比度及其对图像锐度的影响

对比度这一术语，是指镜头-摄像机系统忠实再现所拍摄场景中物体最暗部分、最亮部分以及在这两部分之间的所有中间亮度水平的能力。实现忠实再现这些亮度所面临的挑战首先源于镜头。构成镜头的多个光学镜片会引入眩光(由场景中其他较亮部分造成)和杂光，进而在技术上共同影响黑色再现水平。视场之外的高光也会以散射光形式进入镜头，并侵入所拍摄场景的黑色区域造成光的干涉。另一方面，场景中最亮的强光、曝光过度的部分(室外拍摄时墙壁及玻璃上反射的日光眩光或夜间汽车前灯灯光)会形成强烈的散射和内部反射，而造成各种图像质量缺陷。

特别重要的是，要想保证高图像质量，必须忠实地再现图像的主要曝光区域——构成最黑处与参考白之间全部关键亮度水平的灰度级(在标准的灰度测试图中，参考白达到89.9%反射率)。

在附录1所示的分辨率示意图中，参考低频黑白脉冲的再现准确度，直接体现了镜头和相应摄像机的对比度能力。如附录中所述，系统的MTF是对若干组连续高频黑白脉冲所再现对比度水平的调制。因此，对比度性能与所感受的图像锐度紧密相关。

全新电影镜头的一个具体设计目标，就是在整个图像平面上实现高对比度，从而显著增强图像边缘处的表现锐度。

胶片电影摄影师所提出的图像锐度要求

毫无疑问，长期习惯于胶片电影摄影机拍摄的人士对所感受的图像锐度有一些根深蒂固的主观偏好，完全不同于那些只使用摄像机拍摄的摄像师和演播室摄像师。如何将这种分歧量化为数字电影系统的设计标准，业内为此持续争论了数十年，并对镜头设计工程师构成了特殊的挑战。

面对这种挑战，根据早期电影变焦镜头(某些为胶片摄影师采用)的经验，设计工程师选择了制造商和一些选定的摄影师密切合作的道路，试图更加明确地建立新一代数字电影镜头(定焦和变焦)所需的图像锐度特性标准。讨论就此展开，顾问摄影师们一致认为，当前电影镜头与当代高清摄录一体机结合所拍摄的图像，在高清监视器上感受到的视觉图像锐度“偏硬”。将镜头光圈设置为接近全开(多数摄影师喜欢的设置)，进行人脸特写拍摄时，这种感觉尤为明显。这项工作就是将主观的语言描述转化为有意义的技术规格。

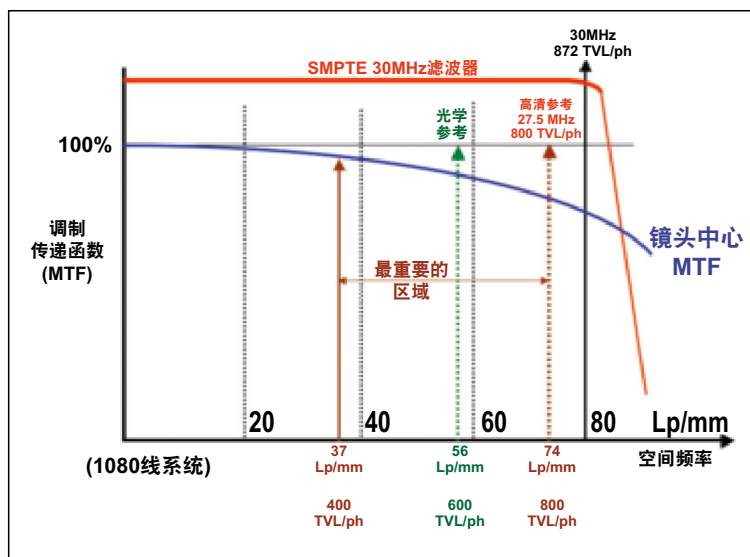


图3. 测试表明在35至75 Lp/mm区域的MTF特性对决定特定图像锐度的作用最大。

人们最初相信，由于MTF正好和观察者在正常观看距离(电视或电影)实际感受到的图像锐度有关联，通过考虑调节MTF可有效地解决视觉偏好的差异。研究开始时，使用一台数字高清1080线摄录一体机进行初始测试拍摄，并将数字图像增强系统完全关闭。从而，在一系列使用各种电影变焦镜头和定焦镜头进行测试的过程中，摄像机本身固有的MTF保持不变。在某些情况下，在镜头前端加装光学滤镜，以深入研究图像的锐度标准。

测试中要在大屏幕上大量观看图像，然后再进行拍摄测试。有一个普遍共识是，在大屏幕上观看图像时，高清镜头-摄像机系统在35至75 Lp/mm范围的MTF特性对于图像视觉效果尤为重要。矛盾的是，某些在此区域MTF较低的镜头，却更受摄影师个人的青睐。如图3所示，该区域位于以水平空间分辨率表示的横轴上(也显示了与1080线高清系统带宽的关系)。这种情况促动研究人员探寻一种技术，可能以某种方法改变此通带低频部分高MTF特性的影响，而在较高的空间频率处实现所需的高MTF特性(在此区域高清摄像机的MTF越来越低)。

实现电影镜头所需图像锐度的指导原则

根据这些工作制定了总体设计原则，以确保实现所需的主观图像锐度。这些针对光学设计师的指导原则总结如下：

(a) 在整个图像平面上实现尽可能高的MTF特性。

(b) 在整个图像平面上尽可能实现精确聚焦。

(c) 实现不受眩光或杂光影响的高对比度。

(d) 在整个图像平面上保持均匀的对比度。

(e) 消除横向色差(模糊或色彩细节错位，特别是在图像平面边缘部分)。

对于具体的光学设计参数，这些要求转化为以下设计任务：

(1) 实现有效的图像锐度特性——根据摄影师制定的指导原则提出的核心要求。

(2) 最小化像场弯曲——造成图像边缘散焦的典型光学像差之一。

(3) 严格控制球面像差和彗形像差。

(4) 最小化横向色差。

(5) 最小化眩光或杂光的光学干扰。

(6) 优化相对光线分布。

寻求可接受的数字电影图像锐度

顾问摄影师们将高清摄像机图像锐度描述为“偏硬”，对此需要仔细研究。只考虑MTF不能实现所需的结果。可以在镜头入口安装适当的光学前置滤镜，以减小造成过强图像锐度的中频段空间频率范围对应的MTF(图4)。然而通过试验性拍摄，我们可以迅速了解到滤镜会对较高空间频率造

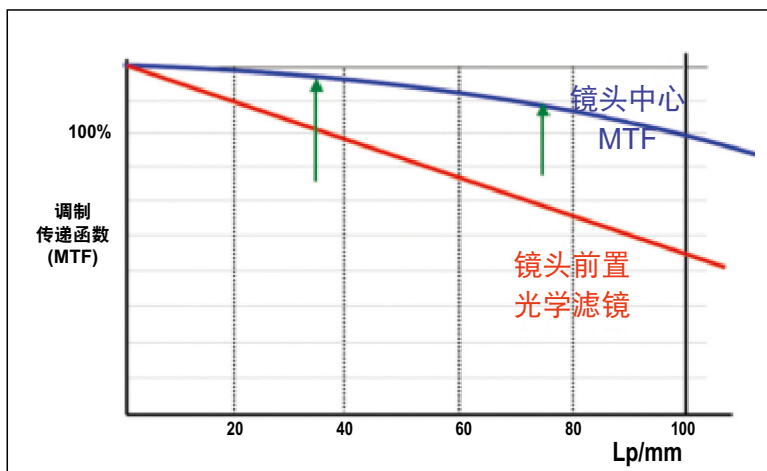


图4. 镜头上的光学前置滤镜可适当降低35至75 Lp/mm区域的MTF，在75至100 Lp/mm区域造成较大损耗(由于高清摄像机在此区域性能快速下降)。

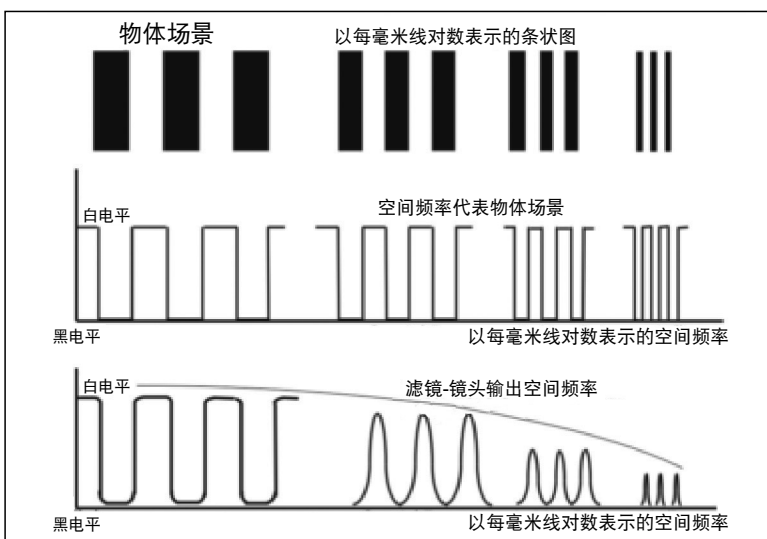


图5. 在镜头入口处安装传统的光学滤镜，试图降低在较低的空间频率上的MTF，结果造成在较高空间频率上信号振幅显著降低，并产生明显的扩散函数。

成不良影响，消除重要的纹理细节。

这种前置滤光方法产生不需要的图像点扩散函数，严重降低了较高空间频率细节信息信号的振幅(图5)。

电影镜头的计算机辅助设计

计算机仿真技术发展至今，镜头设计师已经能够在整个图像平面上优化MTF时对各项参数进行严谨的权衡取舍，并可精确把握各种与镜头焦

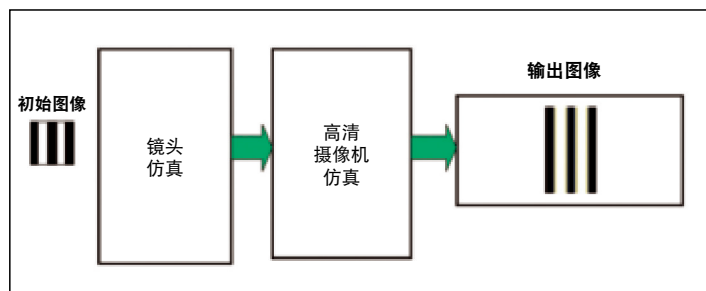


图6. 所采用计算机仿真系统的工作原理：同时对镜头和高清摄像机进行仿真，并将相关结果显示在屏幕上。

距相关的像差之间的平衡。特别值得强调的是，仿真技术已经发展到可以精确预测球面像差、彗形像差和色差的水平。这样强大的设计能力给设计师提供了一个崭新的机会，使其可以设计出能够与数字高清摄像机完美结合的镜头，从而尽可能实现摄影师所期望的“效果”。

从图像锐度的角度来看，设计要求有四方面的任务：

(1) 最大化0-100 Lp/mm高清空间频率范围内的MTF。

(2) 由于横向像差直接影响镜头MTF，需要最小化横向色差。

(3) 最小化彗形像差，以消除视觉上令人不快的图像失真。

(4) 优化球面像差的水平和特性，以合成能够实现所需主观锐度的图像点扩散函数(当这与镜头和高清摄像机的已知MTF特性密切相关时)。

最后一点，也是最关键的挑战，必然涉及到高清摄像机。摄影师所需的独特图像锐度，与摄像机MTF特性错综复杂的细节密切相关，需要对镜头图像锐度属性进行最终调节。幸好，近年来仿真系统经过逐步改进，已经可以做到这一点，而且还能够同时对高清镜头-摄

像机系统的总体色彩还原性能进行研究(图6)。

镜头仿真系统高度复杂，可以处理数量庞大的设计变量。产生的输出传送到高清摄像机仿真程序，后者可以对光学低通前置滤镜、分光棱镜和CCD图像传感器的MTF进行准确地仿真。模拟输出经过模拟到数字(A/D)转换处理后，在数字领域仿真相关的数字RGB摄像机处理。然后，仿真程序的数字输出经过数字到模拟(D/A)转换成最终观看的信号。请注意，应该将图像投射在大屏幕上，以便摄影师可以按照喜欢的方式看到最终优化效果。

这种仿真设计过程包含三个连续的步骤：

- (1) 在整个图像平面上优化镜头的MTF特性。
- (2) 最小化横向色差和彗形像差。
- (3) 优化球面像差。

计算机仿真步骤1——最大化镜头MTF特性

图7中显示了最终MTF优化所实现的镜头性能。在整个0至90 Lp/mm高清空间频率通带上，图像中心达到了非常高的MTF特性(在54 Lp/mm处超过90%，或600 TVL/ph)。要在镜头整个变焦

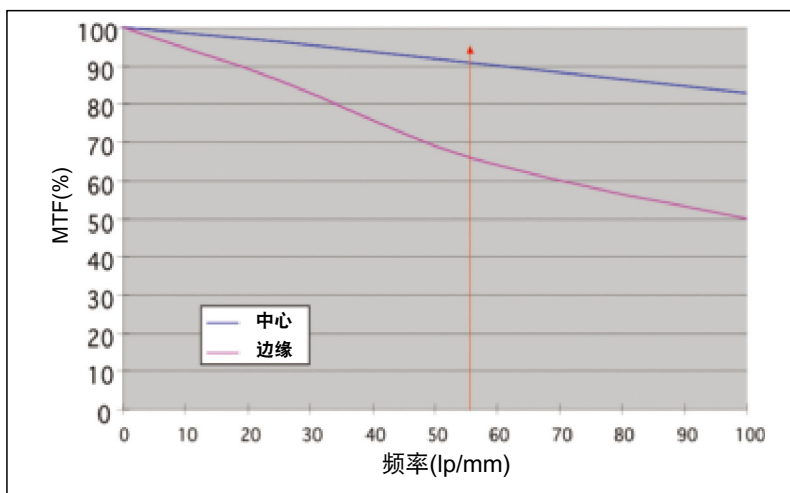


图7. 新型5.5至44mm T2.1电影变焦镜头的MTF特性。

范围和不同光圈设置下继续成功保持高MTF特性，不可避免地会降低图像边缘的MTF特性。但是，即使是图像边缘，在54 Lp/mm处也几乎可以达到70%的相当不错的MTF特性水平。

计算机仿真步骤2——最小化不可接受的失真

为了最小化所谓彗形像差和色差等与焦距相关的像差，我们进行了大量的仿真试验。消除彗形像差(尽可能)对于实现点图像特性(基本消除彗形像差的彗尾特征)特别重要，这会有力支持最后阶段的总体图像锐度优化。这种仿真考虑了很多因素，包括多种可用光学材料的光学特性、非球面透镜设计、镜片分组以及最小化这种像差所要求制造公差的相关等级等。仿真的最终结果几乎可以完全消除彗形像差。

消除横向色差的仿真过程也同样涉及需要大量寻找光学材料、采用非球面技术、使用双镜片组及执行严格制造公差等。最终也取得了非常出色的成果。

为了解决镜头焦距广角端设置时不可避免的桶形和枕形几何失真，我们进行了大量尝试。在宽屏画幅上，几何失真特别令人沮丧(4:3图像中1.5%的枕形失真或桶形失真，在16:9格式下就会转化至几乎2.2%)。协作的摄影师都希望尽可能实现完全精确的图像几何性能，特别是当代影视制作中持续风靡的大量特写拍摄的短焦距处，几何失真最为突出。

我们尝试采用各种光学技术来降低几何失真，特别是创新的非球面镜头镜片设计，并在一些更为关键的光学镜片中使用新材料。

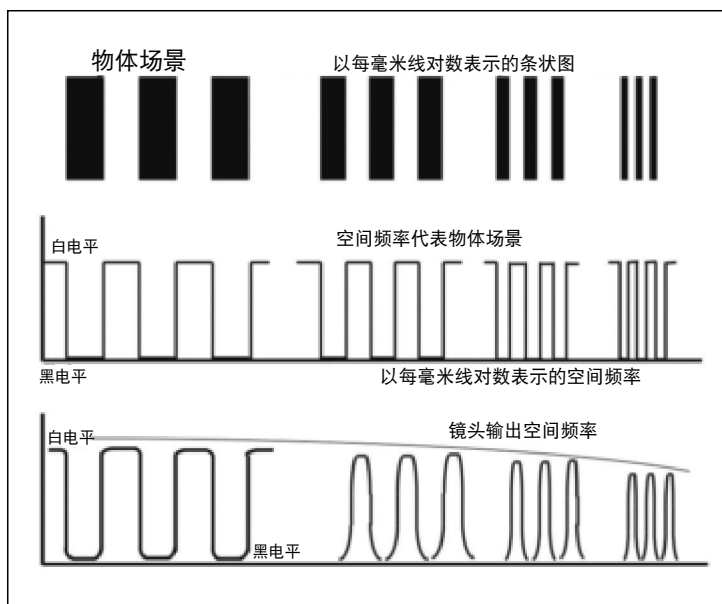


图8. 简单说明合成镜头点扩展函数的原理。通过最大化高清镜头-摄像机MTF(在空间频率通带上形成高振幅的细节再现信号)，同时改变球面像差特性以便在过渡图像的低振幅部分引入严格控制的扩散。

计算机仿真步骤3——实现所需的图像锐度

在最大化镜头MTF特性、最小化关键失真之后，下一阶段的高清镜头-摄像机系统仿真主要是寻找有望产生仿真的最终“创造性”部分的点图像特性：可以这么说，对35至75 Lp/mm空间频率范围的MTF特性进行二次调制，会产生特殊的图像锐度效果。

球面像差本来就会使离轴的物体点图像形成小光斑，而不是清晰的点。这种像差是由于离轴光线纵向聚焦在相应主光轴光线焦点前方某个位置处而造成的。要在镜头设计中实现最高的MTF特性，传统的做法是努力最小化这种像差。而计算机仿真技术已经发展到能够将这种像差控制到非常小的程度。进而这种控制又可调整球面像差的水平和特性。最终可以合成一个严格定义的点扩展函数，通过调节该函数可在关键的35至75 Lp/mm空间频率通带产生所需的“软化”的空间频率(当此效果与复合的镜头-摄像机MTF特性密切相关时)。这种优化的原理如图8所示。

按照上述方式抑制(及精确控制)所有镜片固有的传统球面像差,是电影镜头设计中的一种创新。这极为有效地将反复出现的图像缺陷转化为一个意料不到的促进因素。这有助于忠实再现所需的高清细节的高清镜头-摄像机图像锐度,同时实施一种新的方法在视觉敏感的35至75 Lp/mm空间频率通带上降低过高的锐度。这种优化方式还只是试验性的,因为最终设计决策是在计算机上进行的,并基于所投射的大尺寸仿真图像进行优化结果的主观评估。

所实现的最终结果是导致锐度有一定程度的降低(仅在镜头光圈接近全开时),以合成接近于35mm电影正片投射到大屏幕上的效果。

光谱透射率

所有摄影师都希望尽可能设计出最快的镜头,但也要保证其他的重要成像属性。这些属性包括标准高清镜头-数字摄像机似乎无法实现的对“软”色彩更细致的色彩还原能力。另一个明确的要求是需要在整个图像平面上保持均匀的亮度,特别是在使用大光圈时。所有这些要求直接与镜头的光谱透射率和相对光线分布属性有关。

镜头光学速度

镜头中所有的光学镜片都会衰减通过其中的光通量。只是衰减多少的问题。镜片的入口越大,所能传输的光线越多,但尺寸和重量也随着镜头的口径迅速增加。我们打算将这支独特新颖的电影镜头设计得轻便小巧,因此开始的时候将最终的镜头外部直径确定为95mm。

目前已有的现代光学材料和全新镀膜可非常有

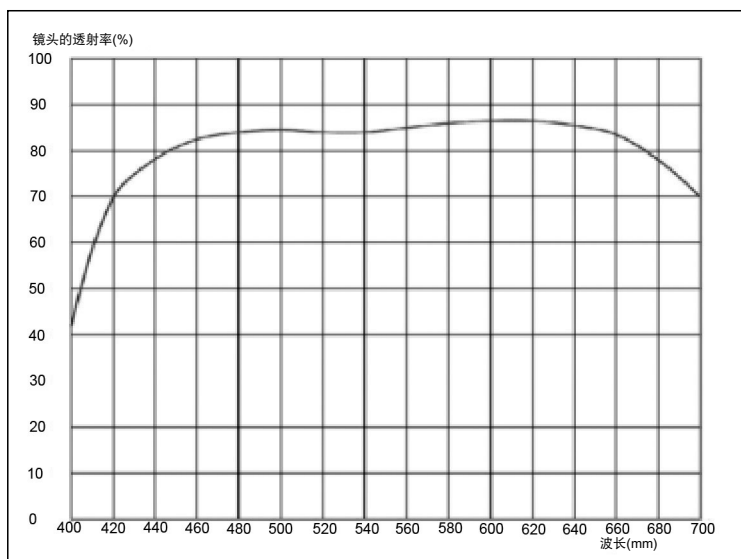


图9. 新电影镜头最终的光谱透射率,其总体透射率达到85%,并可精细调整光谱两端的曲线形状。

效地保证最小化光线衰减。在此镜头的所有镜片上都采用了多层镀膜。尽管如此,事实上电影变焦镜头是由大量这样的镜片构成的,必然会存在一定程度的光线整体衰减,这是难以减少的。而且,这会直接影响到镜头灵敏度或光度孔径规格。

新型电影镜头实现的最终透射率在可见光谱的大部分区域都达到了85%的级别(图9)。这使新电影镜头的光度孔径规格达到T2.1,在大部分变焦范围内都能达到此值,只是在变焦范围的两端轻微下降到T2.2。其光度孔径(使用镜头光圈控制)控制范围为T2.1至T16。应该注意,T值与传统视频F值规格相比,其优势在于后者是一种标定光照水平变化的准确方法,但由于假定通过镜头的光线其透射率为100%,所以并不是绝对准确的衡量标准。另一方面,T值还考虑到镜头的实际透射率因素,可以绝对准确地测量光学灵敏度。F值和T值的数学关系为: $F值 = T值 \times 透射率的平方根 \div 10$ 。例如:对于T2.1镜头,图9中表明平均透射率为85%,相应的F值计算方法为: $2.1 \times 9.2(85的平方根) \div 10 = F1.9$ 。

色彩还原

镜头设计师要同时注意调整多镜片镜头系统的总体光谱响应曲线。该曲线的形状(可见光谱的蓝光和红光处)必须与数字摄像机分光系统的RGB光谱分离、图像传感器的光谱特性以及摄像机制造商采用的线性矩阵策略互相配合,才能实现数字摄像系统的最终色度(图10)。

摄影师都希望对标准高清镜头和高清摄像机中遇到的软色彩实现更准确的色彩还原。他们一般认为ITU R 709-BT色度标准对这种色彩的饱和度要求过高。他们还着重强调,要努力使新型变焦镜头和六支电影定焦镜头之间的色彩还原能力尽可能接近。这成为一个关键的设计目标。

计算机仿真技术可用于分析整个成像系统,从3200° LC演播室红外灯的光谱响应,到各种高清摄像机组件,如红外截止滤镜、棱镜的RGB分离曲线及CCD

图像传感器的光谱响应,如图11所示。此处的仿真系统与图6中的仿真系统相同。

仿真程序采用了色贡献指数(CCI)原理,该指数可以表明特定的数字高清成像系统(或电影成像系统)由不同的镜头透光特性造成的色彩变化量。三个数字以a/b/c的形式表示该指数,这些数字都是相对值,表示为在三个选定RGB原色波长处镜头透射率的对数。将这三个值与ISO规定的参考镜头值进行比较,即可评估色彩平衡(此参考值已经

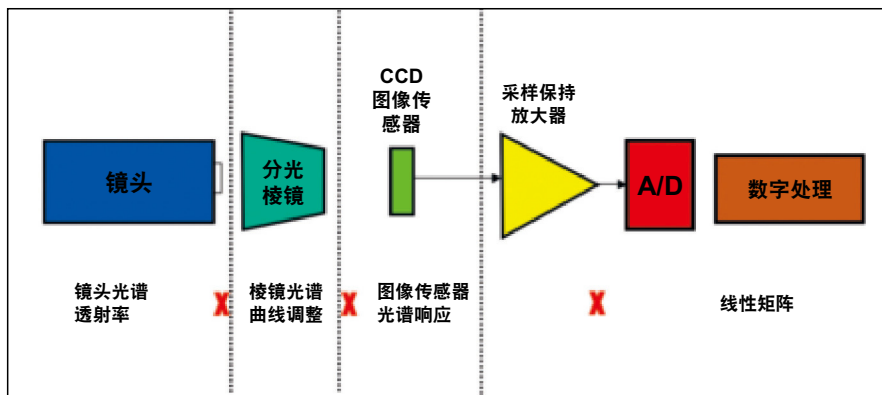


图10. 影响数字电影色彩还原(显示器也必须要考虑)的四个关键系统组件之间的关系。

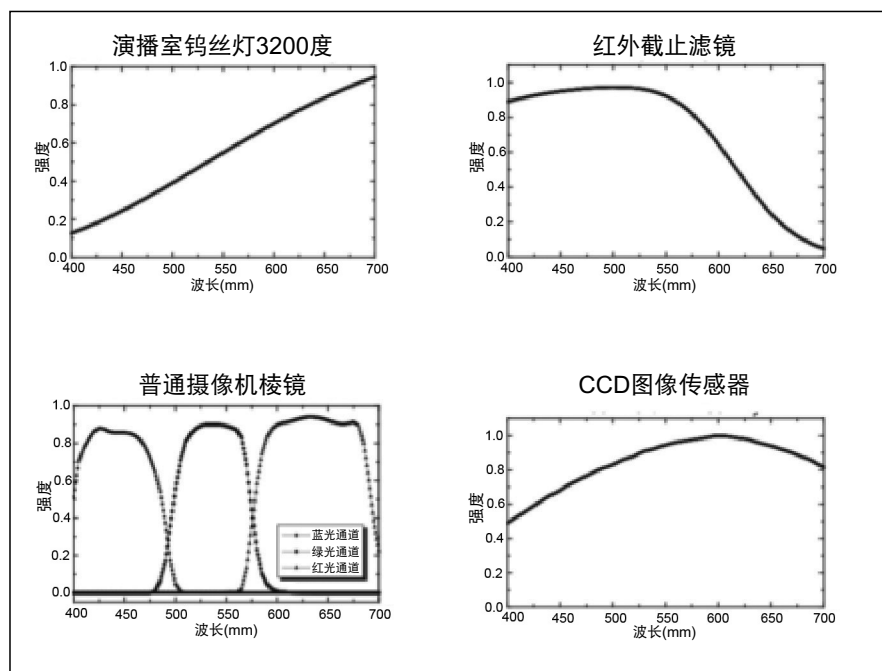


图11. 整个高清成像系统的典型光谱响应,其中需要对镜头光谱透射率曲线进行适当的调整。

通过对多个光学制造商生产的大量镜头进行平均计算而预先确定)。这种方法在实现新型变焦镜头和相应的六支电影定焦镜头之间接近的色彩还原能力时特别有效,如图12所示。摄影师认为这种方法非常重要,在特定的制作拍摄过程中,他们非常不愿意在更换镜头时调整高清摄像机的白平衡。

另外,仿真程序还可用于产生摄影师主观上更喜欢的整体色彩还原效果。这最终涉及到按照

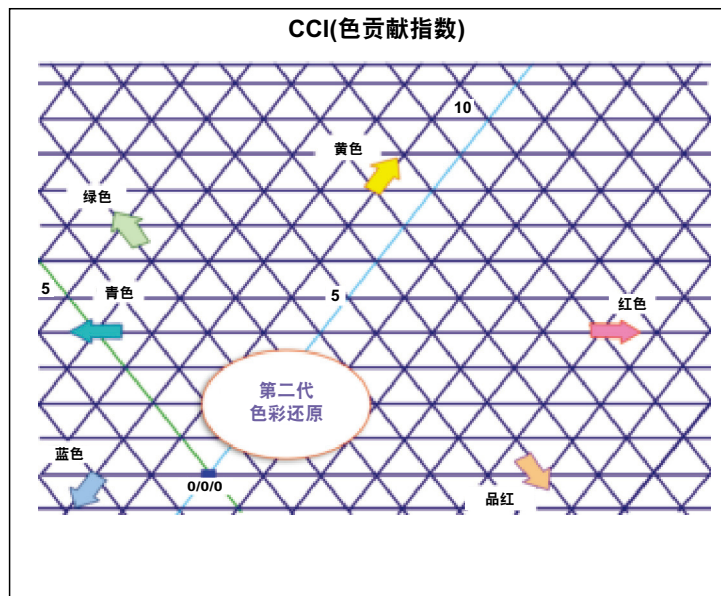


图12. 色贡献指数(CCI)三轴坐标系上对应的ISO公差范围。

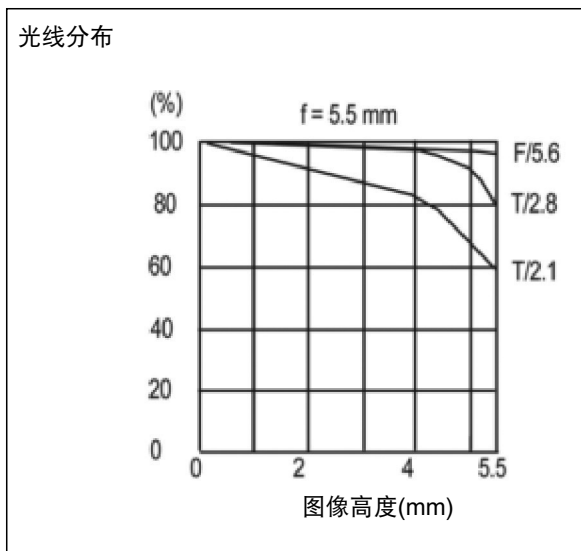


图13. 电影镜头短焦距端的相对光线分布特性，分别对应不同的光圈设置。

图9所示的曲线修改蓝紫光的光谱响应，以实现浅暖色效果。

相对光线分布

所引述的特定电影镜头的T值是一种直接衡量镜头在图像平面中心透射率的标准。光学科学的另一项令人困扰的问题，就是不能在整个图像平面上保持均匀的光通量。两个无法避免的物理现象造成光照水平从图像中心到边缘的降低：第一个是光线强度变化造成的像差，称为渐晕；第二个在光学界称为余弦四次方定律。

两者都会造成光线强度随视场角下降。这种影响称为周边光量或相对光线分布，通常以曲线说明光照水平从图像中心沿径向(称为图像高度)降低，如图13所示。随光度孔径逐渐增大，光照水平的下降就更为严重。这种问题无法避免，但可以通过创新的光学技术降到最低限度。

过去几十年间，我们研究了各种光学补偿技术，逐步改善这种像差的控制水平。一种技术是增大镜头的开口率，即轴上入瞳面积与轴外入瞳面积

之比。在新镜头设计中，减少相对光线分布是另一个主要设计目标。结果，新型电影变焦镜头实现了出色的相对光线分布控制，如图13所示。

镜头的聚焦呼吸效应

全新的数字电影采集系统正在促进传统摄像机和电影摄影之间的融合，这种融合也曾引发了一个技术上长期难以解决的光学问题，但此问题在普通电视拍摄中并不广为人知。该问题与正常的镜头聚焦操作和随之产生的不需要的变焦操作之间的相互作用有关。这种现象称为聚焦呼吸效应，可视为一种在聚焦控制操作时图像尺寸发生不需要的变化(由于不需要的变焦操作造成视场角变化)。

在电影和电视剧拍摄中(历史上使用电影胶片)，在前景和背景之间使用虚焦拍摄可利用景深作用将三维效果在视觉上转换成二维平面成像。而聚焦呼吸效应正是摄影师应用这种优美的创造性聚焦手段时的克星。

二十世纪七十年代的光学创新解决了此问

题。这就是后来称为“三组内对焦法”的技术。这种技术在1985年正式应用于广播级EFP镜头中，并逐渐开始应用于更多的演播室和EFP/ENG镜头。后面的文章对这种解决方案进行了介绍。随着每一代全新镜头设计技术的发展，对于这一技术的改善也在不断进行。在2001年，采用这种技术的光学系统引入到新高清4.7mm至52mm T2.1广角电影镜头中。该技术经过最新改进，也应用于本文所述的新型5.5mm至44mm T2.1电影变焦镜头中。

结论

第二代高清电影变焦镜头的设计反映了一种趋势，即摄影师(他们具有长期使用胶片拍摄电影的经验)和全球众多制造商之间的合作日益深入，共同开发支持数字电影制作的产品和系统。这种合作可以从最新一代的数字电影摄像机上得到体现，现在又体现在相应的电影镜头中。这种合作永远不会停止。

本文讨论的电影镜头设计体现了用户与制造商间的交流与合作，也体现了当代计算机仿真技术的强大能力，使我们可以深入研究图像各个方面的特性。仿真技术最强大的作用在于深入研究镜头-摄像机组合总体性能的能力。

本文的目的有以下几点：(a)介绍最新一代镜头设计中采用的创新技术方法，解决原本视为不可调和的图像锐度要求的矛盾；(b)说明计算机仿真技术如何帮助摄影师们就见仁见智的色彩还原论题达成一致。随着在各种制作中所积累的经验逐渐增多，我们可能会在后面的文章中介绍市场对主观结果接纳的程度。

利用球面像差实现特定主观图像锐度的新设计策略非常有效，当我们分析胶片电影系统模型

时，就会理解其中的奥妙。这里，第一个点图像通过镜头在负片上生成一个放大的图像(由于光线在感光层中漫射)。第二个点图像的尺寸进一步增大，而且其密度分布在胶片冲洗过程中受化学成分的扩散影响而发生变化。经过中间正片和中间负片冲洗处理，然后是最终的正片冲印，最后得到连续的点图像，其中每个后面的点图像都是对前面图像有效孔径扫描的结果。这种不可避免的技术缺陷却无意中在电影荧幕上再现了图像锐度，多年来在技术上也被广泛讨论，一直是创作人士长期钟爱的一种效果。这种长期使用的胶片成像系统可产生一个图像点扩散函数，而利用新型数字电影系统则很难实现。

在这些成果的基础上，我们终于研制出了新型5.5mm至44mm T2.1变焦镜头的原型，并由某些前面提到的摄影师进行拍摄测试。舆论一致认为，一项重要技术进步已经诞生，能够产生所感受的图像锐度和电影摄影师钟爱的色彩还原的高清电影镜头和高清摄像机已成为现实。六支定焦镜头和这支新电影变焦镜头间的性能非常接近。

最后还要指出，在单独扩展电影镜头系列以直接满足电影制作领域不同创作需求的同时，持续不断地开发用于高清广播制作(体育、演播室、新闻和现场制作等)的高清镜头也有重要价值。

附录I

镜头调制传递函数

在一定距离外观看时，最具决定性作用的图像属性是观看者对图像不同部分感觉到的对比度。实际上，在视觉研究领域有一个正式的参数称为对比敏感度函数(CSF)，用于分析视觉感知的微小变化。这个函数直接影响感知的图像锐度。这是因为对比度与分

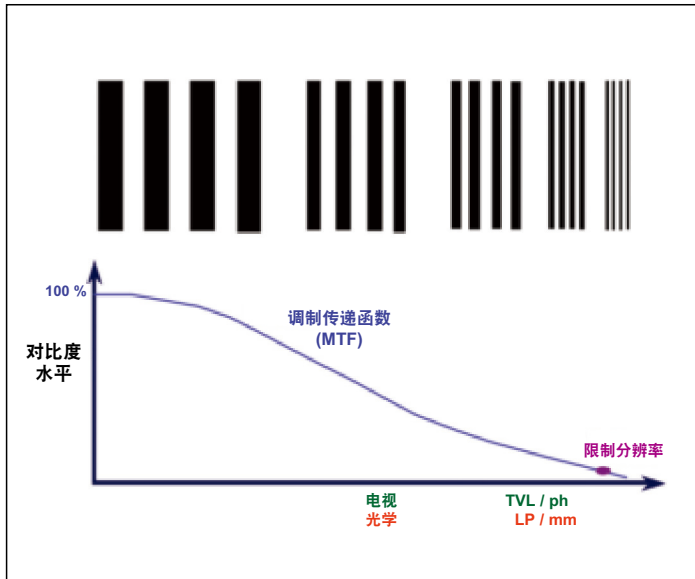


图14. 成像系统的MTF定义为所关注空间频率范围内对比度再现性能之间的关系。

辨细节的能力有密切关系。对于镜头、摄像机和镜头-摄像机组合，使用调制传递函数(MTF)的概念可以有效地分析这种关系。

在观察者(坐在距离图像屏幕一定距离处)面前展示一组相邻的高对比度、低频黑白条纹。结果观察者感知到的图像锐度非常高。而对于一组频率非常高的黑白条纹，看起来一片灰色，没有明显的细节，图像锐度几乎完全丧失。在这两个极端之间，多组频率渐增的黑白条纹，所显示的对比度随空间频率增加而逐渐降低。图像锐度受到了镜头的“调制”，或是受到摄像机的“调制”。这些中间空间频率提供了最实用的锐度衡量标准。

MTF是一个数学术语，用于描述镜头-摄像机系统所拍摄的空间频率渐增的黑白条纹的对比度水平特性。对于特定的系统，一般通过绘制对比度再现能力(竖轴)随空间频率细节(横轴)变化的曲线来描述其特性(图14)。

发表于2004年10月20日-23日在美国加州帕萨迪纳市举办的第146届SMPTE Technical Conference and Exhibition (SMPTE科技会展)上。版权所有© 2005 SMPTE。