

高清大变焦比镜头是 一种精密仪器：

理解镜头对最大化图像性能的意义

作者：Larry Thorpe

采用现代高清大变焦比外镜头意味着移动电视运营商要投入大量的资金。投入的成效可以通过两个突出的操作性能来衡量：一是镜头在构图中所提供的强大创造力，二是图像本身的多方面性能因素。本文描述了实现此目标的精密光机结构所采用的尖端光学技术。这类镜头既是一种极其精致的仪器，也兼具必需的坚固性和可靠性，足以承受镜头-摄像机在长距离搬运和现场装配时所固有的各种重复性物理压力。在高清外镜头精密的设计与制造过程中，必须考虑其广泛的操作环境。频繁使用变焦和聚焦操控装置自然会对相应光机系统的移动部件造成磨损，建议制定预防性维护方案。

打造和装备一台当代体育赛事或娱乐节目高清转播车需要数百万美元，而必备的高清镜头动辄就要花费近2百万美元(对于典型的大型转播车为1200-2400万美元)。这样庞大的数目总是会引发行业内的争论：为什么高清镜头如此昂贵？其性能真的值如此高昂的成本吗？如何在长期使用中更好地保护这样大笔的投入？

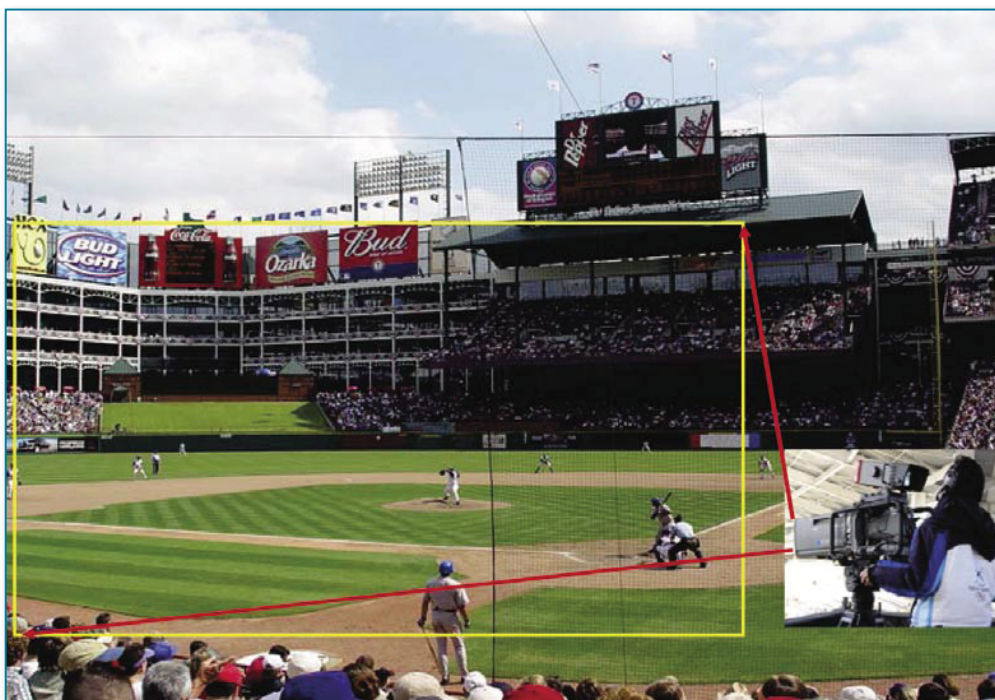


图1：较大的三维现实场景输入到外镜头(设置为较大的视场角拍摄)，而输出一个很小的二维物体图像。

现代高清镜头的资金费用及所能感受到的价值，与所采用的先进技术关系密切，也与能否很好理解这些镜头在日益增大的家用高清显示器上创建优秀高清图像的作用紧密关联。本文的目的是分析当代高清大变焦比外镜头所具有的价值。

分析外镜头的作用

高清镜头经常用于瞭望三维现实场景，通过调节，可以用大视场角来拍摄场景，特别是在体育比赛领域。其图像采样可以形成宏大的场景，如

图1所示——相应地投射进镜头光学入口的模拟数据量也极其庞大。尽管在2/3英寸的镜头出口只能生成一个小二维物体图像——对角线长仅有17mm(在摄像机图像传感器上进一步缩小为对角线长11mm的16:9长方形图像)，但是已经尽可能实现了准确地光学再现巨大的输入数据。分析这些数字时，请注意：镜头光学输出的图像大约只有实际场景前场球员的拇指指甲大小，如图1所示！

另一方面，电视系统高清图像显示的屏幕可能越来越大，现在最大平

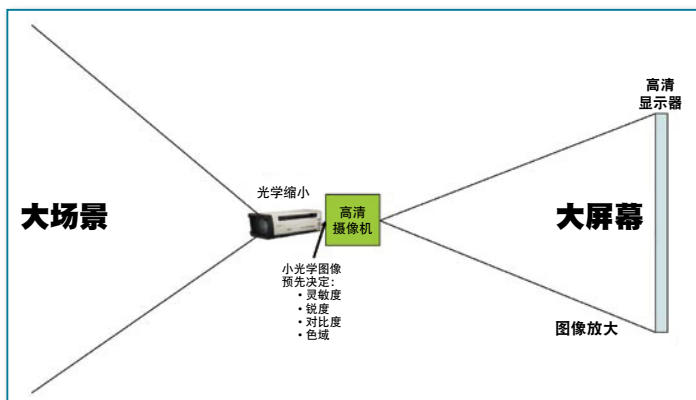


图2: 说明镜头作为高清系统中“成像守门人”的作用。构成高清摄像机输入的小光学图像在这种屏幕上可放大超过200倍。

板高清屏幕的对角线长达100英寸，这就是图像经过第二次放大处理所能达到的效果。

如图2所示，构成高清摄像机输入的小光学图像在这种屏幕上可放大超过200倍。因此，影响总体高清图像质量的多种属性中有任何缺陷都将表现得特别明显。在任何意义上说，镜头都是高清成像过程的核心要素。它是名副其实的系统总体成像性能的守门人。因此，它在整个高清系统中具有重要的价值。

在光学图像到达高清摄像机传感器之前，镜头会对多种图像质量属性产生不可改变的“影响”：

- 镜头预先决定物体图像的亮度(灵敏度衡量标准)。
- 镜头在整个图像平面上的分辨率预先决定了保证后续数字转换所需的最大图像锐度(摄像机的高清视频输出)。
- 镜头的光谱特性预先决定摄像机可以再现的色域。

- 镜头再现场景中真正黑色的忠实度(眩光和杂光光学控制的衡量标准)将成为镜头-摄像机系统对比度范围的决定因素之一。
- 镜头控制超强光源的能力(例如太阳和体育馆灯光)将会决定镜头-摄像机系统动态范围的上边界。

些材料按照光学设计师熟悉的类别分类，每类都有很多种(参见图3)。

当代镜头设计师拥有强大的计算机和极其先进的设计软件工具，可以仿真镜头设计、研究所有备选设计方案和相关的性能参数。他们可以对多种玻璃材料的特性编制程序(目前数百种可选)。最后，选定的光学玻璃材料以坯料(根据所需的玻璃镜片尺寸进行初加工)或块料的形式被交付给镜头制造商，然后利用高精度加工工艺精确地加工出各镜片的形状。

开始阶段

毫无疑问，高清镜头制造从决定采用的玻璃材料开始。这是一门技术活。

光学制造商不断地研发先进光学材料，但在确定制造材料后，一般依靠大型玻璃制造商来生产。

在玻璃材料领域，有许多此类全球专业机

构。Schott、OHARA、Corning、Heraeus Quarzglas、Pilkington、Hoya、Hikari及Sumita只是其中的一部分，他们提供数百种玻璃材料以供选择，每种都具有独特的光学特性。这

镜头镜片的设计

在制造镜头镜片过程中，必须严格遵守指定的公差。保证指定高清镜头特性所需的公差必须要比标清镜头严格一个数量级，这样才能使其在较高的高清空间频率处传输高对比度光线(对于1080线高清系统，所需上限为每毫米81线对)。

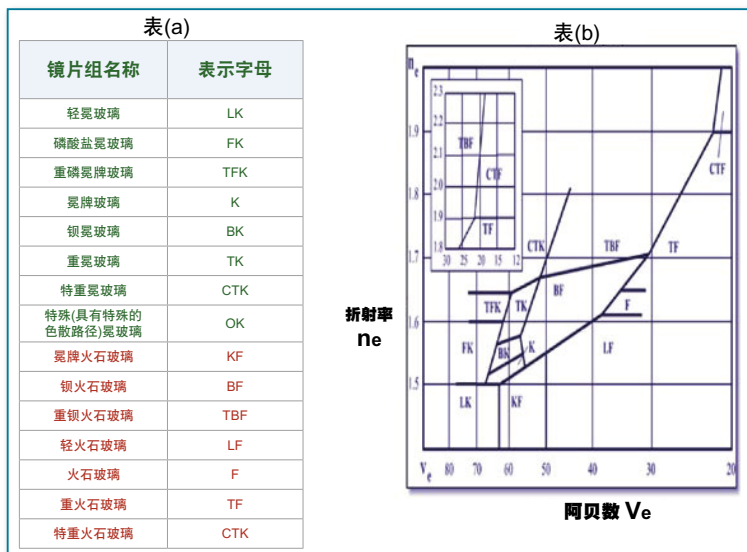


图3: 表(a)中列出了光学玻璃的种类，表(b)则以光学设计师熟悉的图形方式来表示(此处加以简化)——图中以区段表示主要的光学参数，每个区段上对应每种玻璃的多个变量。

对于光学镜片的公差要求包括：曲率半径偏差、厚度公差、楔形公差和倾斜公差等。

镜头镜片的实际加工工艺是一个成本非常高昂的过程。相关的镜头研磨、成型及抛光工艺要求高清光学制造过程必须以纳米级进行。这意味着在昂贵的镜头镜片抛光处理阶段需要花费更多的时间。

而对于某些光学材料，还需要更为严格的公差，会导致成本迅速攀升。对每个镜片进行多层光学镀膜提高了镜头的总体透光性，有助于塑造所需的光谱特性，降低眩光和杂光，辅助整体控制场景中强光源的亮光等。

所有这些设计和制造步骤都不可避免地带来高昂的成本。光学世界存在着无法控制的自然规律，所以没有捷径可循。

多镜片镜头系统的设计——光机设计

每个镜头表面的精度是实现全高清性能唯一的关键要素。将这些镜片放到一个系统化的光学机构中，单独优化每个镜片的光学特性，这对于实

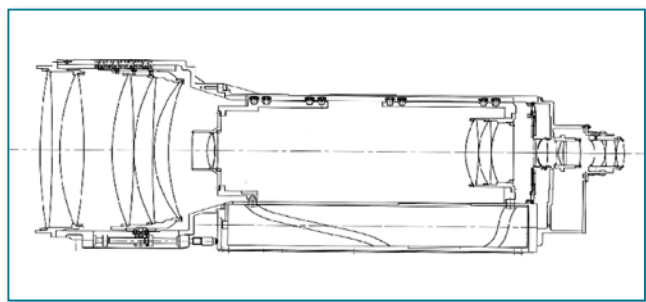


图4：显示了大型箱式高清外摄镜头的横截面(为清晰展示整个镜筒，省略了变焦操作相关的中央镜片)。

现优秀的总体高清光学系统性能非常重要。在组装多镜片镜头的过程中，即使微小的偏差也会导致某种程度的图像质量问题。

光学设计师在分析此类图像质量降低问题时，经常使用“灵敏度系数”这一术语。这有助于确定适当的设计公差和对决定镜头光学精度有重要影响的公差。

公差科学的目的是在制造成本快速增加的极限内，确定满足指定性能规格所必需的公差。

镜头的光机设计是一门非常精密的科学，必须确保镜头镜片严格符合公差要求。大变焦比(在70:1到100:1之间)高清外摄镜头中包含三十多个单独的光学镜片，这些镜片必须按严格的机械公差保持在指定的物理位置上。在光机设计中，要确定光轴(连接各镜片精确光学中心的轴线)相对于机械轴线(包括紧靠光学镜片的所有表面的复杂机械设计)的公差范围。共轴误差是指定两个轴线之间偏差的正式术语。

为确保此性能，高清镜头的全部光学镜片都应该包括在光机设计中，光机设计在数十年中逐渐发展成为整体镜头设计学科的一个独立分支。

其机械结构必须能保证光学系统中各连接光学镜片的持续完整性。在任何意义上说，高清镜头都是一种精密的光学仪器。

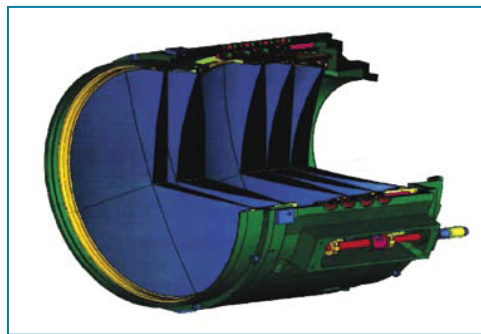


图5：显示了一幅用于辅助设计及计算镜片与机械安装接触面公差的计算机绘图。

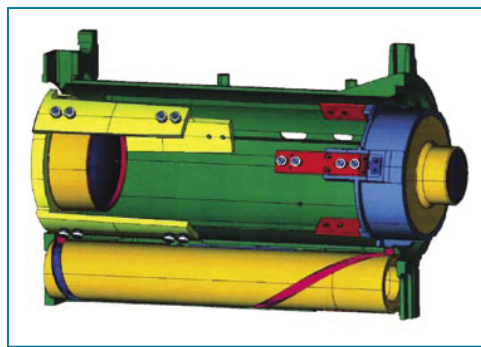


图6：显示了高清外摄镜头主要机械结构的计算机设计图——用于镜头光机的设计。

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之间紧密合作。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。

环境因素

除了确定图像性能规格和保证制造过程满足这些规格外，设计团队还必须预先考虑确保现代高清镜头能够正常工作的操作环境。

温度的过度波动可能会使光学表面发生微小变形，从而导致机械部件膨胀或收缩。外摄镜头曾在地球上的极地、最恶劣的沙漠及热带地区使

用，其精确的光学对准机构必须能承受各种环境下的温度和湿度波动。

此外，总体机械结构必须保证在指定的温度范围内(一般为0到45摄氏度)光学对准的完整性。其存放温度可以超出工作温度的范围，以确保恢复到工作温度范围后能够恢复变形。

必须保证单个镜片在经受过度的环境条件变化后，能够精确地恢复相对的标称位置。过去高热高湿环境经常困扰外摄镜头，在拍摄中有时造成镜头内部起雾，主要在前聚焦镜片上。

当代密封的内部聚焦系统几乎完全消除了这个问题。然而，某些地区的高热或高湿(特别是大雨)的特殊环境还是会造成镜头前光学入口出现雾膜，必须定期仔细擦拭镜头外表面来消除雾膜。也可以在镜头镜筒前部使用加热系统来缓解此问题。

随着使用时间增加，较大的温度或湿度变化与空气污染物及孢子共同作用，导致镜头光学表面上形成一层沉积膜，使透射率和对比度降低(也会影响分辨率)。光学制造商提供预防性维护建议来解决此问题。

必须考虑大型外摄镜头重量过大的问题。性能规格决定了镜头镜片的光学材料、尺寸、数量以及镜头系统组装后的总体尺寸和重量。当代高清大变焦比外摄镜头重量约为50 - 55磅。镜头镜片具有确定的质量，因此当大型镜头在拍摄中快速平移和倾斜时，重量会影响其灵活性。只要能恢复预定的位置，镜头的镜片和机械部

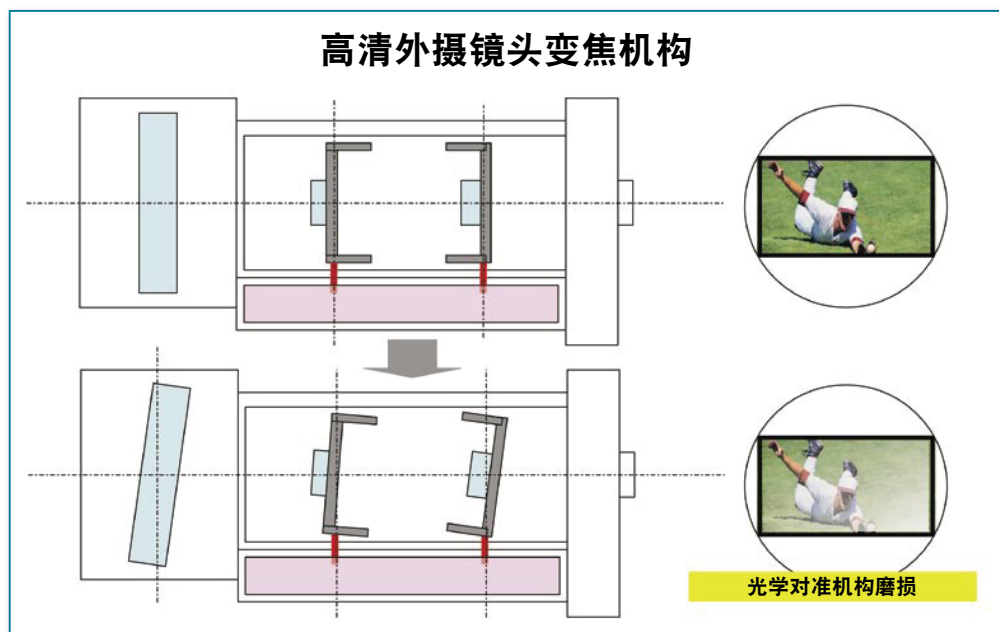


图7. 简单说明了变焦机构长期机械磨损后的结果。

分可以短暂移动。这些必须在设计阶段根据所采用的光学和机械材料加以考虑。

镜头还必须能承受被搬运到远距离拍摄现场所引发的重复机械冲击，以及长时间在颠簸地区运输时的震动。外摄镜头也会受到很大的压力。在过去几十年间，我们一直努力全面解决所有这些问题，最终使镜头光机设计得以优化，实现了当今优秀的高清外摄镜头设计。

光机磨损和操作磨损

镜头除了受各种外力和环境影响外，其光机设计中也必须预见到长期的内部磨损。在变焦控制操作时，各镜片组之间进行极高精度的相对运动。

两个镜片组之间的机械底座通过特殊的可实现镜片组相对运动的导槽来控制。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，结合使用特殊材料，终于将运动相关的磨损降到最低程度。然而，变焦调控装置每年要工作数千次以上，在两到三年的周期内就会不可避免地造成一定程度的磨损。磨损除了会降低变焦操作的平稳性外，还会逐渐降低光学机构的对准精度，进而影响图像亮度、锐度的均匀分布，甚至可能产生眩光。

当关键的光学成像参数呈现很小的性能缺陷时，有经验的摄像师就会迅速察觉。对比度或锐度有所下降就发出一个信号，应该安排相关光学制造商对镜头进行检查维护。

现代高端镜头中采用的内部聚焦系统需要控制聚焦环(手动或伺服控制)，而聚焦环驱动传动轴带动内部螺杆旋转(光机设计中含有移动聚焦镜片的一个精密部件)。镜头聚焦调

控装置重复动作，将驱动当代内部聚焦系统中较大的前部光学镜片发生运动。随着时间增长，这也会导致磨损，从而降低聚焦控制平稳性，并会影响聚焦跟踪。

高清外摄镜头的预防性维护

综合以上原因，建议采用规定的预防性维护方案来维护镜头。像所有的精密光学仪器一样(望远镜和显微镜)，预防性常规维护对高清外摄镜头非常有益。光学制造商积累的丰富经验使他们非常了解磨损的机械原理及其相应的磨损速度。

在完成维护过程后，重新组装的镜头必须在服务中心的光学试验室中进行非常严格的检验。通过镜头投射精确的光学测试图，然后在屏幕上显示较大的成像，对镜头光学性能进行最严格的检查。

总结

光学的发展，发轫于基本光学工具，用于生成图像以便实时观察——显微镜和望远镜，如十六世纪伽利略在天文望远镜方面的成果。又过了很长一段时间，直到十九世纪中叶，镜头才成为在新摄影媒介上拍摄图像的

展成一种具有巨大创造力的器材。高清镜头不但可以为数字高清视频摄像机生成光学图像，而且还是一个强大的图像控制工具，可以强化其艺术效果，增加表现力。高清外摄镜头达到了前所未有的100:1变焦比范围，使体育赛事和重大事件报道更增添了引人注目的戏剧效果。不论从哪个意义上说，这些镜头都是精密仪器。

*Larry Thorpe*是佳能美国广播器材产品部的市场总监。

本文最早发表于2007年9月出版的*Sports Technology Journal*(《体育科技期刊》)。

“对比度或锐度有所下降就发出一个信号，应该安排相关光学制造商对镜头进行检查维护。”

特别建议与配备仪器和专业技术光学技师的认证服务中心合作完成所应采取的维护步骤。预防性维护的一个重要意义在于可以通过及时干预来降低昂贵机械部件的机械磨损，节省日后出现严重问题时昂贵的更换费用。

对于外摄镜头，建议每两年进行一次正规的预防性维护，以清洁光学机构，并重新对准光机系统。如有必要，请更换明显磨损的部件。

而且，两年期的维护还要检查每个光学镜片的清洁度。如果发现光学表面附着异物，应使用规定的清洁剂材料和技术进行清除。

主要工具。消费摄影市场的增长带动了全世界镜头技术的发展，直到今天这种势头仍然不减。

随着在二十世纪初电影的出现，娱乐节目制作成为镜头发展的巨大引擎。在半个世纪后电视的出现，为人们带来了实时动态影像，极大地扩展了影片制作的范围。至此，在日益进步的电影摄影机和电视摄像机的强力推动下，光学镜头更加蓬勃发展。

过去十多年来，高清电视的发展使实时成像的性能达到一个惊人的水平。现代高清外摄镜头是技术与艺术相结合的奇葩。在这个过程中，无数实践者的聪明才智将此光学工具发