

DXC-1610P

摄 象 机 讲 义

摄象机录象机維修技術培訓班編写
中央电化教育館資料交流处翻印

一九八三年四月

目 录

第一章 彩色电视摄像基础	(1)
§ 1.1 概述	(1)
§ 1.2 可见光谱及彩色视觉	(2)
§ 1.3 三基色原理与色度座标	(4)
§ 1.4 彩色重现	(8)
§ 1.5 彩色电视摄像机的光学系统	(9)
§ 1.6 光电导摄像管	(20)
§ 1.7 彩色电视(PAL制)编码器	(33)
§ 1.8 彩色电视同步机	(38)
第二章 单管彩色摄像机的几种方式	(44)
§ 2.1 概述	(44)
§ 2.2 频率分离式	(45)
§ 2.3 三电极方式	(58)
§ 2.4 电标志相位分离式(托尼康方式)	(59)
§ 2.5 阶梯能量解调方式	(62)
第三章 DXC-1610P单管彩色摄像机电路分析	(68)
§ 3.1 总体概述	(68)
§ 3.2 予放器和增益控制放大器	(70)
§ 3.3 亮度信号处理电路(亮度通道)	(79)
§ 3.4 色度信号处理电路(色度通道)	(95)
§ 3.5 同步信号发生器	(130)
§ 3.6 聚焦偏转电路	(139)
§ 3.7 电源	(148)
§ 3.8 寻象器	(150)

第一章 彩色电视摄象机基础

§ 1.1 概 述

电视摄象机是一种把景物图象转换成电视信号的装置，它也是电视设备系统中的关键部分，其性能优劣直接影响最终电视图象的质量。

自1931年第一支摄象管问世后，就开始电视摄象机的研制工作，但正式推广使用还是在第二次世界大战以后，迄今也有三十多年的历史。从摄象技术的发展来看，基本上可以分为两个时期，见图1.1所示。六十年代以前称为真空管时期，六十年代初期是一个转折点，开始进入晶体管与IC时期，在技术上出现了新的突破。从八十年代初期开始又进入了第三个时期——微电子(Micro Electronic)时期，摄象机的功能与质量又将发生新的飞跃。

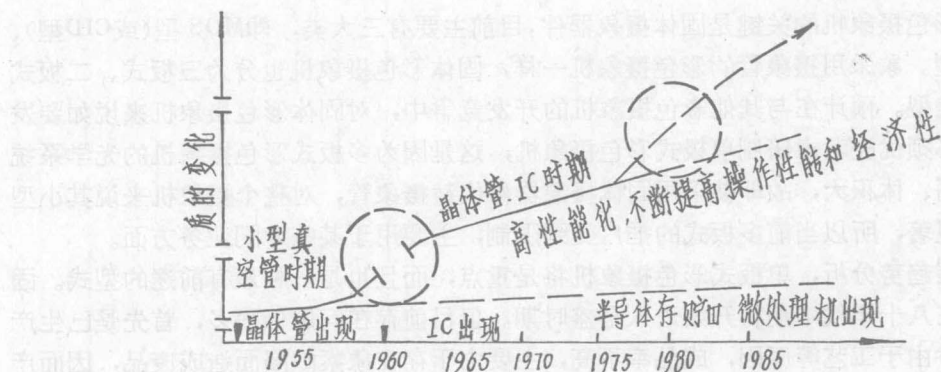


图 1.1

以彩色电视摄象机的重量与耗电两项参数来看，从六十年代初期到七十年代末期，在将近二十年的期间内约减小100倍。六十年代初期，真空管式的3IO(三支超正析象管)彩色摄象机的总重量(包括控制柜)约500公斤，耗电3KW，而七十年代末期的超小型三管式摄象机的重量仅约6公斤，耗电20W，发生约100倍的变化。

从发展品种来看，六十——七十年代之间，世界各有关厂商集中力量发展广播用彩色摄象机，七十年代初期出现了3P(三支氧化铝摄象管)的标准型彩色摄象机(重40公斤、耗电150W)，其性能与数量基本上满足了广播电视台演播室内使用，许多厂商除继续发展广播用彩色摄象机外，开始大力发展应用电视摄象机。

国外由于彩色广播电视已基本普及化，故目前主要以研制彩色摄象机为主。六十年代后期，由于晶体管和IC的发展以及荷兰PHILIPS公司的1英寸PbO摄象管的出现，使彩色摄象机达到比较完善程度，特别是使用带有ACT枪的氧化铅管XQ1080的标准彩色摄象机，其图象性能指标也一直被公认为以后研制新产品的主要评价指标。近十年来，广播用彩色摄象机

的主要发展方向有两个方面,一是研制ENG (Electronic News Gathering——电子新闻采集)和EFP (Electronic Field Production——电子现场制作)超小型便携式彩色摄象机,近几年来发展颇为迅速,今后发展趋向主要有:①新型的摄象管和电路的采用,进一步提高图象质量。②进一步小型轻量化,低耗电化。③调整自动化及增加多种检测功能等等。二是采用微处理机和Triax电缆多重信号方式对多台摄象机进行远距离全自动调整。

国外于六十年代初期就开始研制单管彩色摄象机,当时主要有频率分离与黑标志相位分离两种方式,由于它显示出独特的小型轻量化之优点,引起各国重视。从六十年代末期到七十年代之间又开发了许多其他方式并在应用电视机系统特别是家庭视频装置方面普及推广,目前正是它的全盛时代,方兴未艾。多种方式仍在继续发展,有的被淘汰,归纳当前比较实用并有发展前途的有四种方式,即①频率分离方式;②相位分离方式,主要是电标志垂直相关相位分离方式,或称托尼康方式(TRINICON);③三电极方式;④阶梯能量方式。这四种方式都有各自发展之前途,其他方式也将不断出现。总的说,当前单管彩色摄象机发展趋向主要两方面,一是继续小型轻量化、省电化以及廉价化,以达到普及家庭使用之目的;二是不断提高图象质量和增加操作功能,以达到广播质量之要求。

全固体化彩色摄象机在近1—2年内发展很快,并已开始在业务上应用,但目前迫切要求先在家庭使用方面实用化。

作为固体彩色摄象机的关键是固体摄象器件,目前主要有三大类,即MOS型(或CID型)、CCD型和CPD型。象采用摄象管的彩色摄象机一样,固体彩色摄象机也分为三板式、二板式和单板式三大类型。预计在与其他彩色摄象机的开发竞争中,对固体彩色摄象机来说如要发挥它的优势则必须优先考虑研制单极式彩色摄象机,这是因为多板式彩色摄象机的光学系统仍复杂、价格高、体积大,故即使采用固体摄象器件代替摄象管,对整个摄象机来说其小型化的作用仍不显著,所以当前多板式的推广受到限制,主要用于某些专门业务方面。

从国外发展趋势分析,单板式彩色摄象机将是重点,而且也是一种最有前途的型式。固体彩色摄象机在八十年代中期将开始进入全盛时期。但目前存在问题仍很多,首先是已生产之固体摄象器件由于工艺等原因,成品率不高,主要由于存在象素缺陷而造成废品,因而产量不大,成本也较高。其次是在象素数目和灵敏度等几个性能指标方面还达不到高图象质量摄象机的要求,而且容易产生光晕和各种杂波,拍摄的动态范围也较窄,这些均有待进一步提高。

§ 1.2 可见光光谱及彩色视觉

1.2.1 可见光的光谱

光是客观存在的一种物质,它与熟知的无线电波一样是电磁波的一种,有一定的波长范围。人眼感觉到的光称可见光,它的波长在380—780毫微米(nm)之间[也可用“埃”(Å)来作光的波长单位,1Å=0.1nm],呈现紫、兰、青、绿、黄、橙、红等不同的彩色光谱。我们看到的太阳光大致是呈白色的,但它包括了所有的可见光光谱。

1.2.2 人眼的视觉特点和彩色量

人眼的视网膜上分布着大量的锥状细胞和杆状细胞。在明亮范围的视觉是由锥状细胞来承担,它具有彩色和亮度两种视觉机能,因此只有在白天或光照较强的场合下才有彩色感觉。在暗弱光范围的视觉由杆状细胞来感受,只有灵敏度较高的亮度视觉并无彩色视觉,

因此在夜晚或弱光下辨别不出彩色，所以只有锥状细胞的作用使人眼不仅能感受亮度，而且能感受光波波长的变化即色度。

表达彩色的物理量应与入眼的这一生理特点相对应，因此用亮度和色度两个量综合表示。其中亮度表示该彩色量在视觉上引起的明亮程度，它的强弱决定于光的辐射功率；而色度表示该彩色在视觉上引起的色感程度，它又可用色调和色饱和度两个量来表示，色调表明了颜色的类别，它与光的波长有关；饱和度表示彩色的浓淡，它表明了该彩色掺进白色的程度。

1.2.3 光源与反射体和透射体

辐射单一波长的光源是很少有的，通常大多数炽热固体或液体所发射的光包含有各种波长的可见光以及其他电磁波。光的辐射功率在不同波长上是不同的，光源在波长轴(λ)上的辐射功率分布曲线称为辐射功率波谱，其中在可见光波长范围内的功率波谱称为光谱分布曲线，以 $P(\lambda)$ 表示。并把 $P(\lambda)$ 与550nm波长时的辐射功率之比(人眼对550nm的光最敏感)称为相对光能量分布或相对光谱，以 $\varphi(\lambda)$ 表示：

$$\varphi(\lambda) = \frac{P(\lambda)}{P(550\text{nm})}$$

除了光源外，一般物体不发光，我们所以能看到物体的颜色，是由于照明光源照到物体上，物体有选择性地吸收了某一波段内的光而反射出或透射出余下波段内的光。若以 $E(\lambda)$ 表示反射体的光谱分布曲线，它应是照明光源的 $\varphi(\lambda)$ 与物体反射特性 $\delta(\lambda)$ 的乘积，即 $E(\lambda) = \varphi(\lambda) \cdot \delta(\lambda)$ 。若以 $F(\lambda)$ 表示透射体的光谱分布曲线，它应是 $\varphi(\lambda)$ 与透射特性 $\tau(\lambda)$ 的乘积，即 $F(\lambda) = \varphi(\lambda) \cdot \tau(\lambda)$ 。

1.2.4 黑体、色温和标准光源

包括太阳光在内的大部分照明光源都是热辐射体，并且有连续的辐射功率波谱。热辐射体随温度的变化而使辐射功率波谱发生变化，在温度较低的600℃时发暗红色，随着温度的升高，辐射体的亮度迅速增加，并且辐射光谱向着短波段移动，即从红光区逐渐移向兰光区。为了便于比较和区分各种光源的辐射光谱和颜色，常引用绝对黑体和色温的概念。我们知道黑色物体能吸收光源中各种波长的光而几乎不反射，以致我们看不到它的彩色而呈黑色。如果这个黑体在任何温度下都完全吸收所有组成的光，则我们称它为绝对黑体。绝对黑体不仅能全部吸收外来的辐射，而且在温度升高后同样象热辐射体那样向外辐射，它的颜色象热辐射体一样随温度的升高而发生变化。这样我们就可以利用绝对黑体的温度来表征热辐射体(即光源)的颜色，也就是，改变绝对黑体的温度，当它与被比较辐射体的颜色相同时，则黑体的温度就称为该被比较光源的色温。并用绝对温度°K来量度。例如钨丝灯泡的色温为2854°K。

我们知道太阳光的辐射功率波谱是随着季节、气候和早中晚而发生变化的，大多数灯具光源的 $\varphi(\lambda)$ 也随着灯丝温度而变化。为了有一个比较标准和便于计算，在国际上规定了几种标准白光源，图1.2是几种标准光源的相对光谱分布曲线，其中A(白)是充气钨丝白炽灯所产生的光，相当于色温2854°K的黑体辐射光谱；B(白)近似于中午直射的太阳光，相当于色温4800°K的黑体辐射光谱；C(白)是正常白天在天空中的光，相当于6800°K的黑体辐射光谱；D(白)是白天日光的平均照明，相当于6500°K的黑体辐射光谱；E(白)是一种在可见光波段内等辐射功率的白光，称等能量白光，与5500°K色温的黑体辐射光谱相近，这是一种为了便于

色度计算的假想光源。图中还列出了目前彩色摄象机普遍使用的新式卤钨灯照明光源，它具有色温稳定、亮度高、寿命长、体积小等特点，相当于色温 3200°K 的黑体辐射光谱。

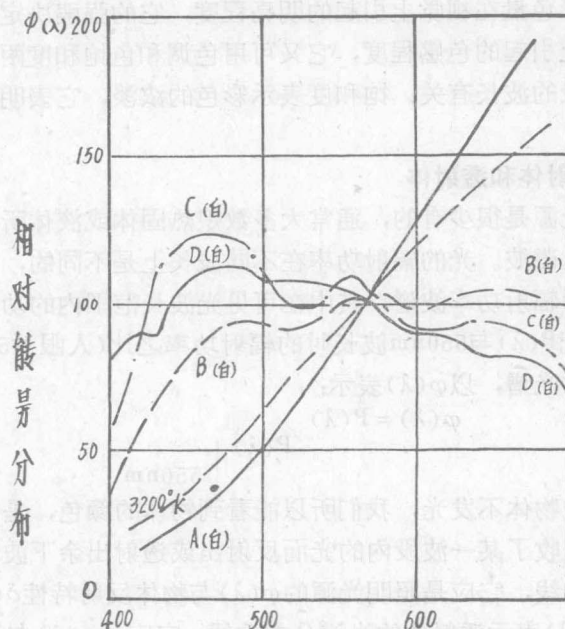


图 1.2 不同色温的标准光源相对光谱分布曲线

§ 1.3 三基色原理与色度座标

1.3.1 加法混色与三基色

由可见光光谱可知，不同波长的光呈现不同的颜色。但反过来说同一种颜色却可以由不同波长的光组成，例如波长为 580nm 的光必呈黄色，而黄色光的波长不一定是 580nm ，因为把 700nm 的红光和 540nm 的绿光按一定比例混合时同样能得到黄色光，这是由于人眼生理上的混色视觉造成的。正是这一人眼生理上的混色功能，使我们简化了复现彩色的方法。我们要获得某种彩色不必从物理角度上去追求它对应的光谱上的单谱色，而只要获得生理上的混合色。这样经过实验和分析，只要预定几种基本色就可仿造自然界绝大多数彩色。经过大量的实验证明，用红、绿、兰三种独立色就可以获得最丰富的各种彩色，这三个色就被称为三基色。如果将红、绿、兰三束单色光投射在一个白色屏幕上作“品”字形迭加，则结果是红色+绿色=黄色；红色+兰色=品红；绿色+兰色=青色；红色+绿色+兰色=白色。如果适当变更混色的比例，则可以得到更多的颜色，三基色间无休止的各种组合，几乎可得到自然界中常见的各种颜色。这种以三基色迭加混色的方法称加法混色，彩色电视中所应用的正是这种加法混色。

除了上述将红、绿、兰三束光同时投射到白屏幕上的加法混色外，还可以将红、绿、兰轮流投射到同一表面上，只要轮换得相当快，利用眼睛的视觉惰性也可得到同样的混色效

果, 这称为时间混色。或者把三种光分别投射到同一表面的不同点上, 只要这三个光点的相互距离相当近, 近到超出眼睛的分辨限度, 也可得到加法混色的效果, 这称为空间混色。如果两只眼睛同时看到二种颜色的同一景象, 也可得到加法混合的效果。

人眼的上述混色效能, 为三基彩色电视的实现提供了方便。

1.3.2 人眼的三感光体学说

三基色原理与生理学上的三感光体学说相符合, 它认为:

① 人眼视网膜上的锥状细胞分为红敏、绿敏和兰敏三种感光细胞, 它们分别对红、绿、兰三色最敏感。三感光细胞对等能量彩色光的感光灵敏度可用图1.3的三条光敏曲线 $v_R(\lambda)$ 、 $v_G(\lambda)$ 和 $v_B(\lambda)$ 来表示, 其峰值分别在 580nm (红)、540nm (绿) 和 440nm (兰) 上。三条曲线有一部分是互相交迭的。

② 三光敏曲线的总和组成人眼的亮度曲线 $v(\lambda)$, 由图可见, 波长 $\lambda = 555\text{nm}$ 黄绿色光, 其感光灵敏度最高, 此时 $v(555) = 1$, 其它波长的 $v(\lambda)$ 都小于1。

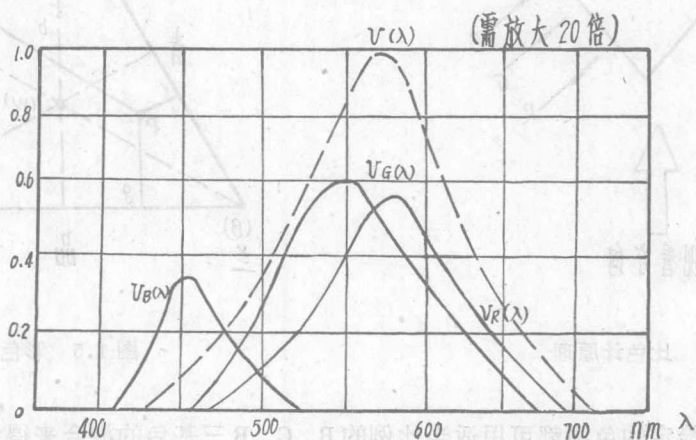


图 1.3 三光敏曲线及相对视度曲线

③ 当光谱特性为 $P(\lambda)$ 的彩色光射入人眼时, 三种锥状细胞的光感觉各为 F_R 、 F_G 和 F_B :

$$F_R = K \int_{\lambda_1=380}^{\lambda_2=780} P(\lambda) v_R(\lambda) d\lambda$$

$$F_G = K \int_{\lambda_1=380}^{\lambda_2=780} P(\lambda) v_G(\lambda) d\lambda$$

$$F_B = K \int_{\lambda_1=380}^{\lambda_2=780} P(\lambda) v_B(\lambda) d\lambda$$

式中 K 为当量常数, 其值为 $K = 680\text{流明/瓦}$ 。也就是对于 $\lambda = 550\text{nm}$ 的光源, 一瓦辐射功率等于680流明。

人眼根据 F_R 、 F_G 和 F_B 的相互比例决定颜色, 根据 F_R 、 F_G 和 F_B 的总和决定亮度, 因此对于光谱分布 $P(\lambda)$ 不一样的光, 只要计算得到的 F_R 、 F_G 和 F_B 相等, 人眼的颜色感觉是一样的。

人眼的这一特性就可使我们运用代数相加和相减的简单方法来推算出几个不同光源的合成颜色特性。

1.3.3 配色实验和色度三角形

上述人眼三感光细胞学说的结论可用图1.4的配色实验得到证实。图示的两个直角面是反射率近于100%的白色表面。在一个表面上投射待配色F，另一个表面上同时投射标准R、G、B光，并配有调节光通量的装置和标出读数。人眼同时观看这两个表面，调节R、G、B的值，当两个表面的颜色完全一致时，所读出的R、G、B值就可换算得相应的彩色量。实验证明，我们用语言描述的颜色几乎都能用上述配色法得到，并发现有时必须把R、G、B中某一色移到待配的那一面才能调得一致，这意味着待配色中某一基色分量是负值。另外，当R、G、B三基色的混合比例不变，若按同一比例增加亮度时，只能使混合色的亮度按同一比例增加。

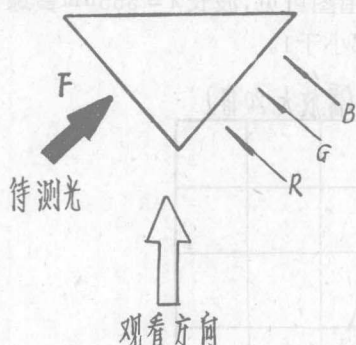


图 1.4 比色计原理

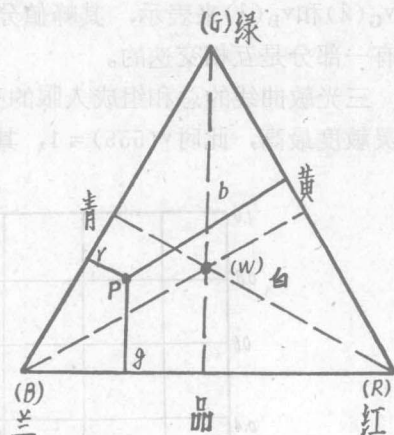


图 1.5 彩色三角形

因此，任一给定的色源都可用适当比例的R、G、B三基色的混合来得到，也就是可以用量值的概念来表示，最简单的方法是图1.5所示的彩色三角形。等比三角形的中心是白色(W)。中心与边沿的连线是代表色调相同、饱和度不同的各颜色，例如GW上的各点，色调都是绿色，但越靠近W点，绿色越淡即饱和度越低，越往G靠近则饱和度越高。穿过W点跨接三角形的任一直线的两个端点表示了互为补色的两种颜色，例如图中的R(红)与C(青)。前曾提及补色的意思是此两种颜色只要以适当的比例混合就可得到白色。彩色三角形内任一点的颜色都可用R、G、B以不同的比例混合得到。例如F点，它与各边的距离r、g、b就代表三基色的混合比例。

1.3.4 物理三基色与计算三基色

彩色三角形以最简单和直观的形式给出了某一彩色的三基色混合比例。如果配以坐标表示就能以数字形式精确地表示彩色量。根据上述的配色实验，任一彩色量都可由三基色组成，并以配色方程表示： $[F] = R(R) + G(G) + B(B)$ 。式中[F]表示某一特定色度和亮度的彩色量，R(R)、G(G)、B(B)分别表示组成[F]的三个基色分量，其中(R)、(G)、(B)分别表示三基色的单位量；R、G、B是三基色单位量的混色比例，称为三基系数，决定彩色量的色度与亮度。

按三种独立的物理基色作为配色基础的系统称为物理三基色。在物理三基色中规定以配出一定白光的三基色的量作为基色的单位量。即：

红基色单位: (R) = 波长700nm的红光 1 光瓦

绿基色单位: (G) = 波长546.1nm的绿光4.5907光瓦

兰基色单位: (B) = 波长435.8nm的兰光0.0601光瓦

由上述各 1 个单位的基色量就能配出标准白的白光 $E_{\text{白}}$ 。[$E_{\text{白}}$] = 1 (R) + 1 (G) + 1 (B), 此时 $E_{\text{白}}$ 的光通量为 (1 + 4.5907 + 0.0601) 光瓦 = 5.6508 光瓦。如果待配的是单位功率 (1W 功率) 单色波长的任意光谱色, 所需的三个基色 (R)、(G)、(B) 的数值用 $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 、 $\bar{b}(\lambda)$ 表示, 称为分布三系数, 则

$$F(\lambda)_{1W} = \bar{r}(\lambda)(R) + \bar{g}(\lambda)(G) + \bar{b}(\lambda)(B)$$

经过大量实验对于波长从 400nm—700nm 的各光谱色的分布三系数, 国际上作了规定, 其值由表专门表示, 按此数据给出的曲线称为物理三基色的光谱响应曲线。

上述物理三基色系统在计算上有不便之处, 一是三系数中没有一个系数代表亮度, 必须经过计算来求得亮度; 二是光谱响应曲线 $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 、 $\bar{b}(\lambda)$ 中包含有负值部分, 在计算时容易出差错。为了计算方便, CIE (国际照明委员会) 另外规定了一组假想的三基色, 称为计算基色, 其配色方程表示为:

$$[F] = X(X) + Y(Y) + Z(Z)$$

与 (R)、(G)、(B) 相对应, (X)、(Y)、(Z) 为三基色的单位量, 但规定: 基色单位 (Y) 不仅包含色度并且还表示亮度, (X) 和 (Z) 不包含亮度仅包含色度。

1.3.5 r-g 色度图和 x-y 色度图

既然三系数 R、G、B 的相对比例代表了彩色量的色度, 在只要确定色度时就只须知道它们的相对值, 因此引入相对系数 r、g、b, 并规定: $r = \frac{R}{m}$, $g = \frac{G}{m}$, $b = \frac{B}{m}$, $R + G + B = m$, 则 $r + g + b = 1$, $[F] = R(R) + G(G) + B(B) = m[r(R) + g(G) + b(B)]$ 此时只要知道 r 与 g 就完全解决了色度, 这是因为 $b = 1 - r - g$, 而 m 只是与光通量有关, 对色度并不产生影响。

既然只有两个独立参数, 就可利用直角坐标方便地表示色度, 图 1.6 是以 r 作横坐标, g 作纵坐标的 r-g 色度坐标。对于红基色来说不存绿与兰的成份, 即 $g = 0$, $b = 0$, $\therefore r = 1$ 。同理对绿基色来说 $g = 1$, $b = 0$, $r = 0$, 这样就确定了 (R) 和 (G) 在 r-g 坐标中的位置分别为 (1, 0) 和 (0, 1)。对于 (B), $\because r = 0$, $g = 0$, 故在坐标原点 (0, 0), 此时的 $b = 1$ 。对于等能量 $E_{\text{白}}$, 前规定的 $R = G = B = 1$, 故 $r = g = b = \frac{1}{3}$,

则 $E_{\text{白}}$ 的坐标为 $(\frac{1}{3}, \frac{1}{3})$ 。各

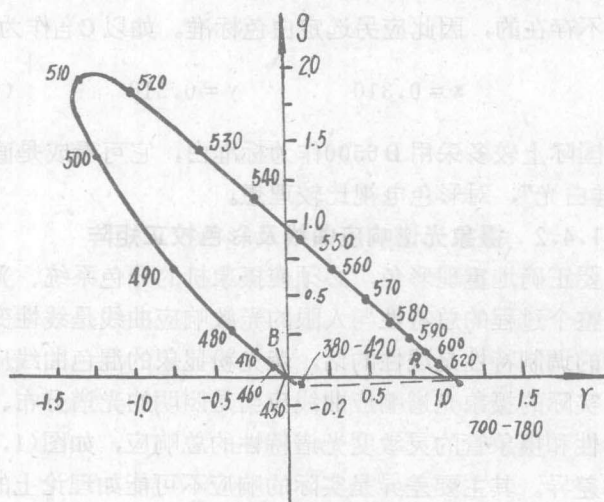


图 1.6 r-g RGB 色度图

谱色的坐标点都可以根据 r 、 g 、 b 系数确定,其连线称为谱色曲线,即图1.6中的舌形曲线,该图称为 r - g 色度图。自然界中所有的颜色都包括在舌形曲线内,每点代表一种色度,越靠近谱色曲线饱和度越高,越靠近 $E_{\text{白}}$ 的点其饱和度越低。

对于 (X) 、 (Y) 、 (Z) 计算基色同样可以用相对系数表示色度。

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

而 $x+y+z=1$,于是只要知道其中两个相对系数就可得出第三个,从而同样可建立平面直角坐标来确定色度并构成 x - y 色度图。

§ 1.4 彩色重现

上述扼要介绍三基色原理的目的在于如何适当选择显象三基色和确定摄象光谱的响应曲线,以及还应采取什么措施使得电视中的彩色重现尽可能失真小。

1.4.1 显象三基色和标准白的选定

前述的物理三基色 (R) 、 (G) 、 (B) 是位于谱色轨迹上700nm (R) 、546nm (G) 、435.8nm (B) 的三点,纯度很高,即饱和度100%,这样的纯度在实际制造显象管荧光粉时很难达到,即便勉强达到亮度也很低。为了达到较为合适的发光强度就要求所选择的显象管荧光粉三基色 (Re) 、 (Ge) 、 (Be) 应略离开谱色曲线。

三基色荧光粉材料确定后就可测出它们受电子激发所发光的辐射光谱分布 $P_R(\lambda)$ 、 $P_G(\lambda)$ 、 $P_B(\lambda)$,并可求出 (Re) 、 (Ge) 、 (Be) 的 X 、 Y 、 Z ,于是求得 x - y 坐标。不同制式的三基色荧光粉的色度坐标值在国际上都有统一的规定。从 (Re) 、 (Ge) 、 (Be) 所确定的配色三角形的色域与物理三基色 (R) 、 (G) 、 (B) 的色域有差别,即对位于和靠近谱色曲线上的彩色不能配出。由于这些高饱和度的彩色在自然界中很少看见,并且人眼对它们的分辨灵敏度不高,所以影响不大。

确定了显象三基色后还必须定下标准白,这样才能确定三系数,并且显象管所显示的白场标准也就定下。在物理三基色中是以 $E_{\text{白}}$ 作为标准的,但 $E_{\text{白}}$ 是假想的等能量白色,实际上是不存在的,因此应另选定白色标准。如以 $C_{\text{白}}$ 作为标准白,它在 x - y 图中的坐标为

$$x = 0.310 \quad y = 0.316 \quad (z = 0.374)$$

目前国际上较多采用D6500作为标准白,它可看成是直射阳光与散射天空光的混合色,接近“标准白光”,对彩色电视比较理想。

1.4.2 摄象光谱响应曲线及彩色校正矩阵

要正确地重现彩色,必须使摄象机的分色系统、光电转换、电信号处理、传输和显象的混色整个过程的总特性与人眼的光敏响应曲线是线性变换的。如果电信号的处理、传输和显象管的调制特性是线性的话,荧光粉显象的混色曲线应当与摄象光谱响应曲线一致。

实际的摄象光谱响应曲线应当是照明的光谱分布、镜头的透射特性、分色棱镜的分色光谱特性和摄象管的灵敏度光谱特性的总响应,如图(1.7)所示:可见与理论上的总响应有较大的差异。其主要差异是实际的响应不可能如理论上的摄象光谱响应曲线那样有负区,因为从照明到摄象管和输出都是正值。

为了补偿两者的差异,常采用电路上的模拟负区方法来校正。由图可见,负区都是付瓣

并位于相邻主瓣的下面。例如红响应的负区近似在绿响应主瓣的下面，因此只要将绿信号倒相并取出一部分加入到红信道中去，就模拟了红的负区，这个过程将可用一个 3×3 的矩阵来完成，因此模拟负信号的电路又称为彩色校正线性矩阵。也可不采用矩阵方法而是对分色棱镜的分色特性曲线的形状作适当的修正，近似模拟抵消理想曲线中的负值部分。

§ 1.5 彩色电视摄像机的光学系统

1.5.1 概述

光学系统是决定电视图象质量的关键部件之一。三管式摄像机的光学系统包括分光系统和变焦镜头（或定焦镜头）两部分，而分光系统又有中继型与棱镜型两种，前者的特点是要求镜头的后截距短，地磁场对重合的影响小，而且也有利于摄像机的重心位置；后者要求专用的长后截距镜头，但结构简单牢靠并且耐机械冲击，分光特性也较理想，故近年来多被采用。对于单管彩色摄像机不存在专门的分色系统，故要求镜头的后截距与普通黑白摄像机所用镜头一样，只是在彩色象差方面有特殊要求。以前，小型化彩色摄像机用变焦镜头的种类不多，一般多用 6~10 倍率，但由于使用要求不断提高，种类增多，特别是长焦距和高倍率镜头，现已发展到 12~14 倍率，故要求摄像机能对多种类型的镜头方便地互换使用。

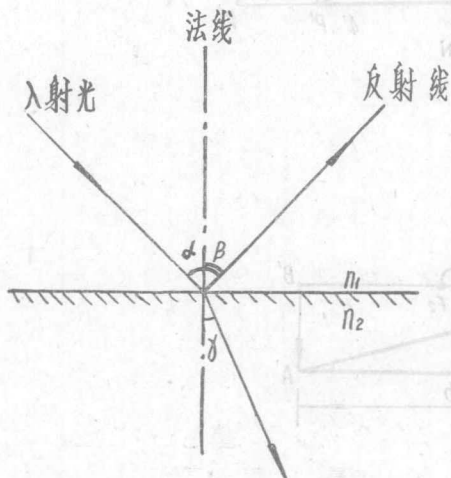


图1.8 光的反射与折射

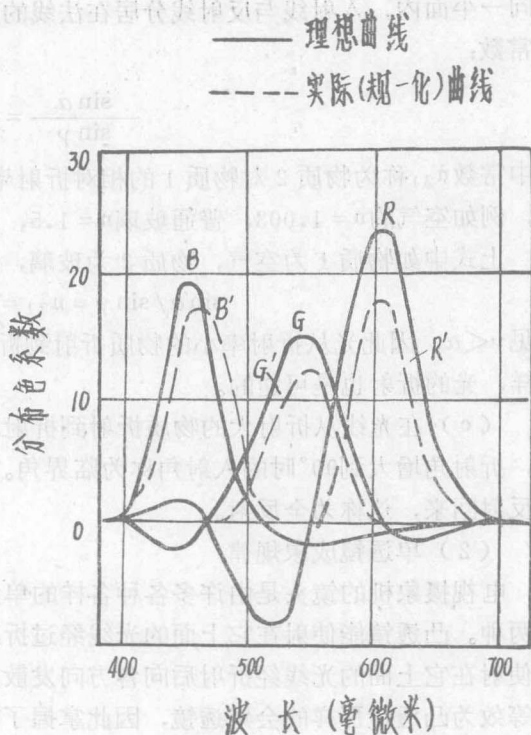


图1.7 实际与理想的摄像光谱响应曲线比较

1.5.2 光学镜头

一、与电视有关的几何光学基本知识

(1) 光的反射、折射和全反射

众所周知，光在两种不同物质的交界面会发生反射和折射。根据大量的实验结果得到如下的结论：

(a) 光线斜射入两种不同物质的交界面时会发生反射。入射线、反射线和垂直界面的法线在同一平面上且分居在法线的两侧；入射角 α 等于反射角 β ；反射是可逆的，如图 1.8 所示，这称为光的反射定律。

(b) 对透光物质来说，在入射的同时光线还会从物质 1 折射到物质 2，折射线与入射线和法线

在同一平面内，入射线与反射线分居在法线的两侧；入射角 α 的正弦和折射角 γ 的正弦之比为一常数：

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21} = \frac{n_2}{n_1}$$

式中常数 n_{21} 称为物质2对物质1的相对折射率， n_2 和 n_1 分别为物质1和物质2的绝对折射率，例如空气的 $n=1.003$ ，普通玻璃 $n=1.5$ ，光学玻璃 $n \approx 1.6$ 左右。

上式中如物质1为空气，物质2为玻璃，则

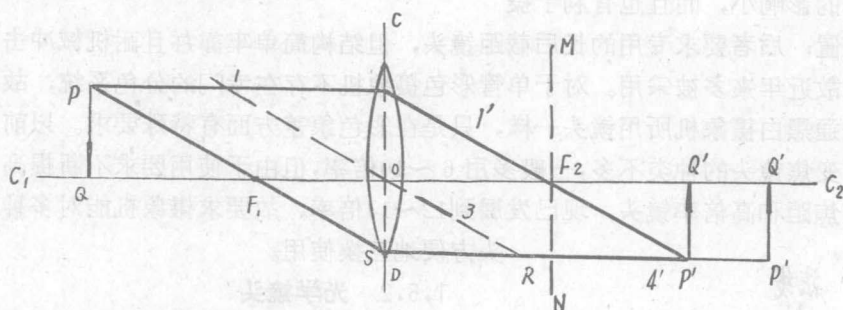
$$\sin \alpha / \sin \gamma = n_{21} = n_2 / n_1 = 1.5 / 1.003 \approx 1.5$$

可见 $\gamma < \alpha$ ，因此光从折射率小的物质折射到折射率大的物质，则折射角小于入射角。与反射一样，光的折射也是可逆的。

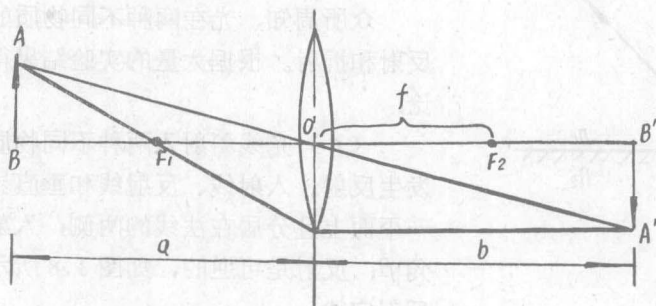
(c) 在光线从折射大的物质折射到折射率小的物质时，当入射角增大时折射角也增大，折射角增大到 90° 时的入射角称为临界角。入射角大于临界角时，光线就从界面上全部被反射回来，这称为全反射。

(2) 单透镜成像规律

电视摄像机的镜头是由许多各种各样的单元透镜所组成。其中最基本的是凸透镜与凹透镜两种。凸透镜能使射在它上面的光线经过折射后全聚在一起，故又称为会聚透镜。凹透镜能使射在它上面的光线经折射后向各方向发散，故也称发散透镜。电视摄像机的镜头一般都是等效为凸透镜那样的会聚透镜，因此掌握了凸透镜的成像原理就能深入了解镜头的技术参数和应用性能。



(a) 任意光线作图法



(b) 作图法的简化

图1.9 凸透镜成像作图法

图 1.9 所示凸透镜成像的作图方法, C_1 和 C_2 分别是组成薄凸透镜的两个球面的球心, O 是透镜的中心, 叫光心或主点, 通过 O 和 C_1C_2 的光线称主光轴, 通过 O 与主光轴垂直的平面 CD 称为主平面, 凡与主光轴平行的入射光线全聚于光轴上某一点 F , F 称为透镜的焦点。光线从前后两个球面都可平行入射, 故焦点有 F_1 和 F_2 两个, 分别称为前焦点和后焦点。

由 P 点发出的平行光线 1 折射后变为通过 F_2 的直线 1; 由 P 点发出的任一光线 PS , 折射后必聚焦在焦平面 MN 上, 又必与平行它的付光轴 3 交于一点 R , 所以 SR 就是光线的折射光线。 SR 的延长线 4' 与 1' 的交点 P' 就是 P 的象点, 这样物体 PQ 的象平面位置就随之而定。

如选择特殊的光线可使作图法更为简便, 如图 1.9(b) 所示。我们把焦点 F 到主点 O 的距离称为透镜的焦距 f , 把物体与 O 的距离 a 称为物距, 把 $A'B'$ 与 O 的距离称为象距, 则据几何法则可得下列两式:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \quad \frac{A'B'}{AB} = \frac{b}{a} = m$$

上式称为凸透镜成像公式, m 为象放大率。

在镜头的设计过程中, 往往用凹透镜和凸透镜组合在一起的方法来改善质量。凹透镜的作图法与凸透镜类似, 但它是以发散光线的延长线来得到焦点的, 所得象是虚象, 因此也把它称为负透镜, 如图 1.10 所示。在作图时往往以带有内向箭头的主平面 CD 来代表凹透镜, 由于凹透镜是虚焦点和虚象, 只要把凸透镜成像公式中的焦距、象距加一负号就变为凹透镜的成像公式:

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{b} = -\frac{1}{f} \quad \text{放大率仍以 } m = \frac{b}{a} \text{ 表示。}$$

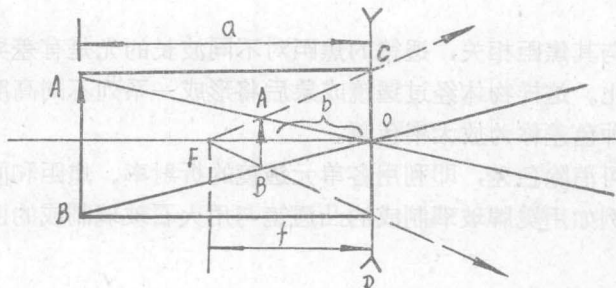


图 1.10 凹透镜成像作图法

二、单透镜与镜头

单透镜虽能成像, 但象的质量既模糊又变形大, 因此实际的镜头都是用多块单透镜组成以提高成像的质量。

(1) 球面象差及其补偿方法

我们知道实际拍摄的物体并不离透镜无穷远, 所以从物体到达镜头的不是平行光。图 1.11 中从 P 点发出的光线经过透镜折射, 近轴光线在 P' 点会聚, 远轴光线在 P'' 会聚, P'' 和 P' 不重合, 即造成象差。显然透镜的孔径越大象差越厉害, 透镜的球面率越大象差越

厉害，因此这种象差称为孔径象差或球面象差。

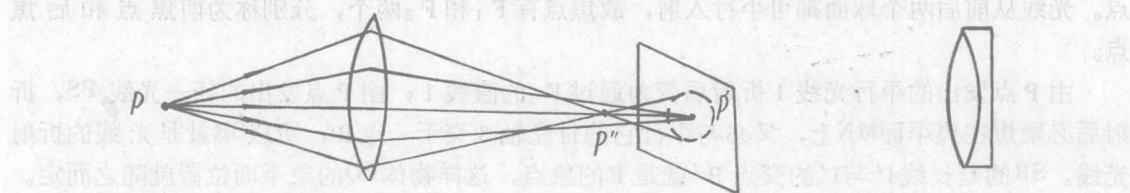


图1.11 球面象差及其补偿

假如我们把成像面放在 P' 点上，则 P 点在该处的象不是一个光点而是一个中央较亮、边缘模糊的小圆，称为弥散圆。所以球面象差使得物体的象变得模糊，如用图示那样一凸一凹的组合透镜代替，透镜就能补偿球面象差，这是由于透镜边缘部分的光线虽在凸透镜处偏折得厉害些，但通过凹透镜时却发散得厉害些，从而二者得到了补偿。此外尚有慧差、象散等象差，它们也是使得光点变成弥散圆而降低了图象的清晰度。

(2) 色差及其补偿

透镜对不同波长的光折射率是不一样的，例如短波长的兰光折射率大，长波长的红光折射率小。因此入射的白光经过透镜后，组成白光的各种波长的光会聚在不同的点上，例如红光的会聚比兰光远些，这样在成像面上不再是个白点，而是以某色点为中心的彩色圈。这种对不同颜色的光造成前后位置的象差称为位置象差。前述放大率公式可改写为 $m = \frac{1}{\frac{a}{f} - 1}$ ，

可见，透镜的放大率与其焦距相关，透镜的焦距对不同波长的光是有差异的，因此放大率也随不同波长的光而变化。这样物体经过透镜成像后将形成一系列不同高度的色象，波长越长，象的放大率越大，这种色差称为放大率色差。

采用组合透镜也可消除色差，即利用各单元透镜的折射率、焦距和间距的适当组合把色差降低到最低限度。例如用冕牌玻璃制成的凸透镜与用火石玻璃制成的凹透镜组合在一起可显著地消除位置色差。

(3) 几何畸变及其补偿

物体离光轴的距离不同，透镜对它的放大率是不一样的，这样垂直于光轴的物体它各处的放大率随距光轴的距离的不同而不同，因而造成了几何畸变。如图1.12所示， O 为光轴，在垂直于光轴的正方形中， A 点离光轴的距离 r_2 比 B 点离光轴的距离 r_1 为大，如透镜对离光轴越远的物体放大率越大，则成像后 $\frac{r_2'}{r_1'}$ 比 $\frac{r_2}{r_1}$ 为大，则正方形就变成枕形。如透镜对离光轴越远的物体放大率越小，则成像后 $\frac{r_2'}{r_1'}$ 比 $\frac{r_2}{r_1}$ 为小，正方形就变成桶形。因此放大率 m 随物体点离光轴距离增加而变大时所产生的畸变为枕形畸变或称正畸变；当 m 随物体点距离增加而减小时产生的畸变为桶形畸变或称负畸变。

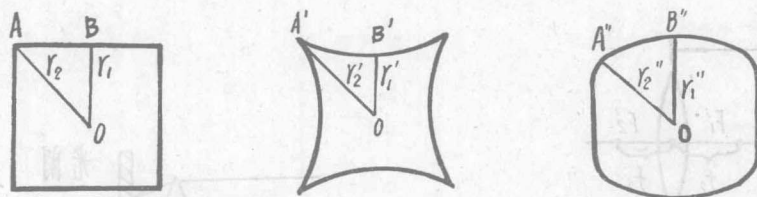


图1.12 枕形畸变与桶形畸变

几何畸变常用对称组合透镜来补偿，因此电视摄象机镜头往往采用对称的或近似对称的光学系统。

(4) 镜头的主点、焦点、组合焦距和成像公式

由上述可知透镜的成像会产生一系列象差和色差，因此实用的镜头是把若干透镜组合成一个镜头。

镜头在作图上常用一个等效厚透镜来代表，如图 1.13 所示。与单透镜一样它有前后两个焦点 F_1 和 F_2 ，但它的主点有两个，分别以前主点 H_1 和后主点 H_2 表示。前主点 H_1 到前焦点 F_1 的距离称为前焦距 f' ， H_2 到 F_2 的距离为后焦距 f'' 。它的作图方法与凸透镜相似，其成像公式也可用前述的单透镜成像公式表示，不过 a 表示物体到前主面的距离， b 是象到后主面的距离。

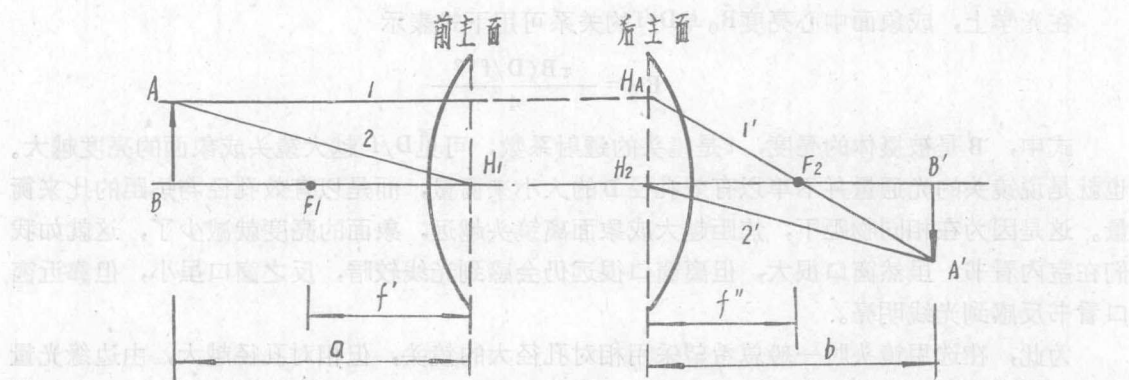


图1.13 镜头的作图法

组合透镜的焦距 f 由单元透镜的焦距和相互的距离决定。例如如图 1.14 中由两个单透镜组成的镜头 f 经变换与运算可得：

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$$

式中 f_1 、 f_2 分别为透镜 1 与透镜 2 的焦距， d 为两个透镜的间距， f 为组合透镜的焦距。

三、镜头的技术参数和特性

有了上述几何光学的初步知识，就可帮助我们熟悉电视摄象镜头的基本参数和特性。

(1) 光圈的相对孔径

我们俗称的电视摄象机的光圈实际上叫光圈指数 F ，它是相对孔径 D/f 的倒数。

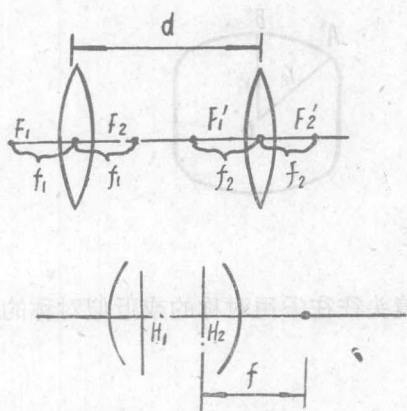


图1.14 组合透镜的焦距

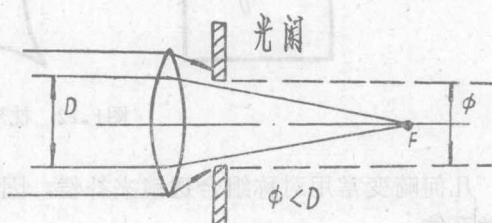


图1.15 有效孔径

由图1.15所示，并不是所有的平行光线都可以通过镜头聚焦到F点，因为有光阑挡住了镜头边缘部分的光，使得镜头实际最大的有效孔径为D。从图可知，由于折射的关系，相应于最大的有效孔径的光阑的口径 ϕ 总是比D小。在光学上把D称为入射光瞳，称 ϕ 为出射光瞳。相对孔径 $\bar{O}$ 就是D与f（焦距）之比即：

$$\bar{O} = D/f$$

在光学上，成象面中心亮度 B_0 与 D/f 的关系可用下式表示

$$B_0 = \frac{\tau B (D/f)^2}{4}$$

式中，B是被摄体的亮度， τ 是镜头的透射系数，可见 D/f 越大镜头成象面的亮度越大。也就是说镜头的光通量并不单以有效孔径D的大小来衡量，而是以有效孔径与焦距的比来衡量。这是因为在相同物距下，焦距越大成象面离镜头越远，象面的亮度就减少了，这就如我们在室内看书，虽然窗口很大，但离窗口很远仍会感到光线较暗，反之窗口虽小，但靠近窗口看书反感到光线明亮。

为此，在选用镜头时一般总希望采用相对孔径大的镜头，但相对孔径越大，由边缘光量造成的象差就越大，为要校正象差，镜头的成本就要增加。特别是对于长焦距镜头，要提高相对孔径，只能大大增加有效孔径，这样对材料与工艺均带来苛刻要求，重量、体积与成本也随之大为增加。

一般给出的 D/f 是指最大的相对孔径，我们可以通过调整光阑口径的大小来改变相对孔径，并标有刻度。刻度就是以光阑指数F来表示的，F的分值为1.4、2、2.8、4、5.6、8、11、16、22等，F越大表示 D/f 越小。这些刻度值有一定规律，即后一个值正好是前一个值的 $\sqrt{2}$ 倍，这是因为 $B \propto (D/f)^2$ ，这样正好使成象面的亮度在前一分刻度值是后一分刻度值的一倍。

(2) 成象尺寸与视场角

不同口径的摄像管对镜头要求的靶面成象尺寸由下列表给出：

摄 象 管 口 径	成 象 尺 寸 (mm)
2/3英寸光导管	6.6×8.8
1英寸光导管	9.6×12.8
1¼英寸氧化铅管	12.8×17.1
3英寸超正析象管	24×32

当成像尺寸一定时镜头具有一个固定的视野。我们常用视场角 2ω 来表征镜头视野的大小。如图 1.16 所示, 根据光路的可逆性, 经过前焦点 F_1 的光线 (1) 和 (2) 通过镜头后就平行投射到成像面上, 如果 H 正好为成像尺寸的高度, 则 2ω 就是该镜头的视场角, 图中物体 $A'B'$ 因落在 2ω 之外, 所以就有一部分象落在成像尺寸以外, 由图可见

$$\omega = \operatorname{tg}^{-1} \frac{y/2}{f} = \operatorname{tg}^{-1} \frac{y}{2f}$$

$$\therefore 2\omega = 2 \operatorname{tg}^{-1} \frac{y}{2f}$$

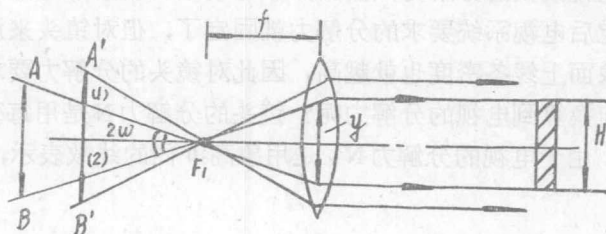


图1.16 镜头的视场角

若 y 是成像尺寸的高度, 则 2ω 称为镜头垂直视场角, 若 y 是成像尺寸的宽度, 则称为水平视场角。焦距越短, 视场角越大, 所以短焦镜头又称广角镜头。对于照相镜头习惯上是以成像尺寸对角线来计算视场角的, 因此在采用照相镜头作电视摄像机镜头时应予注意。

(3) 焦距、后截距和最近摄象距离

我们知道焦距对镜头的相对孔径和视场角有密切关系。另外, 从放大率公式可知, 当物距 a 固定时焦距 f 决定了象距 b 的大小, 从而也决定了象的放大率 m , 故焦距是电视镜头的一个重要参数。一般把镜头分为长焦、中焦和短焦三种。中焦距镜头是指焦距与成像尺寸接近的镜头, 同样, 焦距小于成像尺寸的称为短焦镜头, 大于成像尺寸的称长焦镜头。

实际使用中所摄的象都大大小于被摄物体, 即放大率 $m \ll 1$, 则 $m = \frac{b}{a} \ll 1$, $\therefore b \ll a$

$$\text{而 } f = \frac{ab}{a+b} \approx \frac{ab}{a} = b, \quad \text{则 } f \approx b$$

由于象距 b 近似等于焦距 f , 因此成像面几乎就在后焦平面内。我们通常称镜头最后一片