

# 第一章

## 彩色电视基础知识

电视技术是根据人眼的视觉特性，将一具有光学特性的景物转换为电信号并通过信道实时传送出去，接收机则把电信号恢复成光学图像，利用显示设备重现原来景物的技术。因此，为了更好地理解彩色电视原理有必要从技术角度去了解光学、色度学以及彩色电视的基础知识。

### 1.1 光与色度学基础

#### 1.1.1 光的特性

由光学理论可知，光是属于一定波长范围内的一种电磁辐射。广播电视技术研究的是人眼能够看到的可见光范畴。可见光是电磁波谱中很小的一部分，它的波长范围为：380 nm～780 nm 给人眼的彩色感觉依次是紫(品红)、蓝、青、绿、黄、橙、红(如图 1-1 所示)。只包含单一波长成份的光称为单色光；包含两种或更多波长成份的光称为复合光。复合光给人眼的彩色感觉为混合色，最常见的太阳光就是一个波谱带，由无数的单色光组成，著名的三棱镜折射实验就可以验证这一点。由于不同波长折射率不同，白色的阳光便分解为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫的彩带，所以白色的太阳光实际上是七彩的阳光在人眼形成的混合感觉。

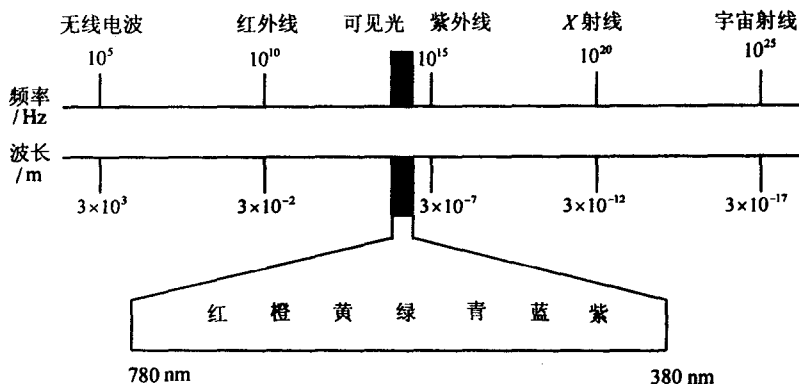


图 1-1 电磁辐射波谱

人眼的彩色感觉是主观(人眼的视觉功能)和客观(物体属性和光照条件的综合效果)相结合的系统中所发生的生物-物理过程。能自然发光的物体称为光源，太阳就是最大最常见的自然光源。自然界中，在太阳光的照射下，由于物体本身的属性，反射或透射了可见光谱中的不同成份而吸收其余成份，从而引起人眼不同的彩色感觉。如果光源照射条件变化了(即光谱成份变化了)，景物所反射或透射光源光谱中的不同成份及吸收其余成份也会随之发生变化，

引起人眼的彩色感觉也随之发生变化。

能够被人眼感知的色源有两类：一类是本身不发光的物体，它反射或透射光源光谱中的不同成份而吸收其余成份，呈现一定颜色；另一类是本身发光的物体，它辐射的光谱成份引起人眼的彩色感觉。在第一类色源中的极端情况是物体全部吸收入射光的所有光谱成份，这种物体在色度学中被定义为“绝对黑体”。当绝对黑体被加热时，将以电磁波的形式向外辐射能量，其辐射谱成份仅由温度决定。反之，知道绝对黑体的温度也就能够知道其辐射谱成份，可推知其颜色。可见，绝对黑体的热力学温度与其颜色是相关的，所以被定义为“色温”。同样，可以定义光源的色温：若光源的光谱特性与某一特定热力学温度下绝对黑体辐射的光谱特性相同，则绝对黑体的这一特定温度就定义为该光源的色温，色温的单位是开[尔文](K)。例如：钨丝灯泡的温度保持在 2 800 K 时发出的白光，与温度保持在 2 854 K 的绝对黑体所辐射的波谱成份相同。于是称此时的灯泡光源的色温为 2 854 K。可见色温并非光源本身的实际温度，而是用来表征其光谱特性的参量。有些光源的光谱成份只与某一温度的绝对黑体所辐射的波谱成份相似，而不能精确等效，这时把与光源光谱最接近的绝对黑体的温度称为该光源的相关色温。

为了使光源的比较和色度计算有统一的标准，电视技术中通常采用国际规定的 A、B、C、D<sub>65</sub>和 E 共 5 种主要标准光源（即标准白光）。

A 光源 相当于钨丝灯在 2 800 K 时发出的光，色温为 2 854 K 光谱能量主要集中在红外区。

B 光源 接近正午直射的阳光 色温为 4 800 K 可用特制的滤色镜从 A 光源得到。

C 光源 相当于白天的自然光 色温为 6 700 K 可用特制的滤色镜从 A 光源得到。

D<sub>65</sub>光源 相关色温为 6 500 K，相当于白天的平均光照。

E 光源：是色度学中假想的一种等能白光。在可见光谱内，所有光谱成份都有相同的辐射功率，色温近似为 5 500 K 这种光源实际并不存在。

### 1.1.2 视敏度与彩色三要素

视觉效应是由可见光刺激人眼引起的。如果可见光的辐射功率相同而波长不同，不仅色感不同，而且亮度感觉也不相同。即要引起相同的亮度感觉，则不同波长的可见光辐射的功率是不同的，这就是视敏度的概念。为了得到相同的主观亮度感觉，在波长为 555 nm 时，所需要光的辐射功率最小，随着波长在 555 nm 处逐渐增大或逐渐减小；②所需辐射功率都将增大，或者说视敏度不断下降。

视敏度在不同光照条件下的表现不尽相同。例如，在白天正常光照条件下，人眼既能产生明暗感觉，又能产生彩色感觉。而在夜晚或微弱光线下，视敏曲线左移，如图 1-2 所示 光线暗到一定程度时人眼将分辨不出彩色，而只有明暗感觉，这就是在夜晚看到的暗处景物是灰色，分辨不出正常彩色的原因。所以彩色感觉是一种明视觉。

平均亮度在适当情况下，亮度慢变化时，人眼能感知的亮度最大与最小值之比可以达到 1 000 : 1 主观亮度不仅与视敏度有关，还与环境亮度有关。在某种亮度环境 B 中 人眼能感知的最小亮度变化  $\Delta B_{\min}$  是不同的 但是  $\Delta B_{\min}/B$  却基本是一个常数  $\xi$ 。

在色度学中，为了确切表示某一彩色光，采用亮度、色调和色饱和度三个基本参量。彩色视觉是人眼对这三个参量的总体感觉。

亮度是光作用于人眼所引起的明亮程度的感觉。彩色光辐射的功率越大则亮度越大，反

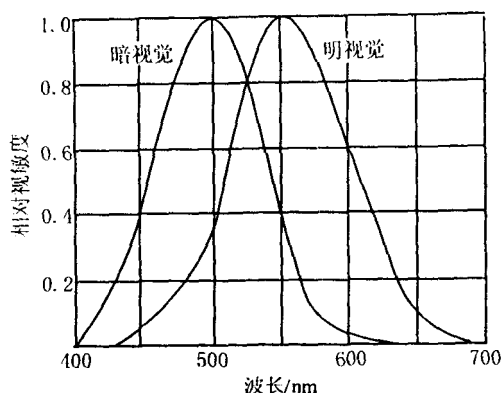


图 1-2 明视觉与暗视觉的光谱光效率

之，亮度越小。光源的亮度取决于其辐射的光功率，而不发光物体的亮度，则取决于物体反射或透射系数和照明光源亮度。黑白图像的内容体现在亮度差别上，因此亮度作为能表达图像基本差别的参量，在图像传输系统中（包括黑白电视系统和彩色电视系统）是必须传送的。

色调反映了彩色的类别。通常所说的红、绿、蓝指的就是色调。彩色光的色调取决于它的光谱成份。色调是决定彩色本质的基本参量，是彩色的基本属性之一。彩色物体所反映的色调不仅与它反射或透射的光谱分量有关，还与光照条件有关。

色饱和度是指彩色光所呈现彩色的深浅程度（或浓度）。对于同一色调的彩色光，彩色越浓越纯，其饱和度越高，颜色也就越深；饱和度越低颜色越浅。也可以说，饱和度表示某一彩色光掺进白光多少的程度，或者说纯净的单色光被白光冲淡的程度。

亮度、色调和色饱和度构成彩色光的三个要素，这也是彩色电视系统为什么传送三个参量的本质原因所在。色调和色饱和度又合称色度，它既说明彩色的颜色类别，又说明颜色的深浅程度。

应该强调指出的是，虽然不同波长的单色光会引起不同的彩色感觉，但相同的彩色感觉却可以来源于不同的光谱成份组合。例如：适当比例的红色光和绿色光混合，可以产生与黄色光相同的彩色感觉。又如，呈现白色的日光是一种连续光谱，但也可以由红、绿、蓝三种不同波长的单色光以适当比例混合成白光。事实上，几乎自然界中所有的彩色都能由三种基本彩色光混合配出，这就是对彩色电视有重要意义的三基色原理。

### 1.1.3 三基色原理

根据色度学的介绍可知，不同波长的单色光会引起不同的彩色感觉，但相同的彩色感觉却可以来源于不同的光谱成份组合，而人眼只能体会彩色感觉却不能分辨光谱成份。电视技术正是利用了人眼的这个特性，在彩色复现过程中，并不要求恢复原景物辐射的光谱成份，重要的是重现景物应与原景物有相同的彩色感觉。几乎自然界中所有的色彩的彩色感觉都能由三种基本彩色光混合配出，如果适当地选取三种基色光，将它们按不同比例进行合成，就可以引起各种不同的彩色感觉。

三基色选取的原则：首先，三者必须相互独立，也就是说其中任意一个基色不能由其它两基色混合配出，这样可以配出较多的彩色。其次，自然界中绝大多数彩色都必须能按照三种基

色分解。再次，人眼应对三基色有较高的敏感度。在彩色电视技术中根据三基色的选取原则，选择红色、绿色和蓝色作为三基色，将它们按不同比例进行混合，合成彩色的亮度由三基色亮度之和决定，而色度（即色调和色饱和度）则由三基色分量的比例决定，这就是三基色原理的主要内容。

三基色原理对彩色电视技术很重要，它把传送具有成千上万、瞬息万变彩色波谱的这一任务简化为传送三个基色光（信号）。

#### 1.1.4 混色原理

电视技术中所采用的，将三种基色光按不同的比例相加而获得不同彩色光的方法，称为相加或加法混色，如图 1-3 所示。某两种或三种基色光相加作用于人眼所引起的彩色感觉与某种彩色光作用于人眼所引起的彩色感觉相同，通常就说这些基色光相加得出这种彩色光。

自然界中绝大多数彩色光都可以由红色、绿色、蓝色三种相互独立的基本色光混配而成。混配的规律如下：

红光 + 绿光 = 黄光；红光 + 蓝光 = 品光；绿光 + 蓝光 = 青光；红光 + 绿光 + 蓝光 = 白光。

在电视技术中采用的相加混色方法主要有以下几种：

(1) 时间混色法：将三种基色光按一定顺序投射到同一全反射白色表面，只要轮换的速度足够快，利用人眼的视觉惰性，人眼的彩色感觉将与三种基色光直接同时混合时相同，这种方法称为时间混色法。它是顺序制彩色电视制式的基础。

(2) 空间混色法：将三种基色分别投射到同一全反射白色表面上邻近的三个点上，只要这些点之间相距足够近，由于人眼的分辨力有一定限度，因此人眼的彩色感觉将是混合色，这种方法称为空间混色法。它是同时制彩色电视制式的基础。

(3) 生理混色法：利用两只眼睛同时分别观看不同颜色的同一幅图像，也可以获得混色效果，这就是生理混色。

与彩色电视不同，在彩色印刷、彩色胶片和绘画中采用的是相减混色法。相减混色是利用颜料、染料的吸色性质来实现的。例如：黄色颜料吸收蓝色（黄色的补色）光，于是在白光照射下，反射光中因缺蓝光而呈黄色。在相减混色法中用黄色、品色、青色作为三基色，它们分别吸收各自的补色即蓝色、绿色和红色如图 1-4 所示。

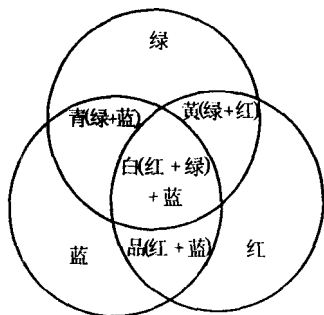


图 1-3 相加混色

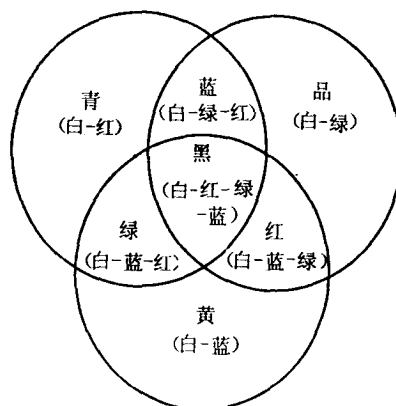


图 1-4 相减混色

### 1.1.5 彩色的度量和表示

根据三基色原理,选择红色、绿色和蓝色作为三基色,将它们按不同比例进行混合,则合成彩色的亮度由三基色亮度之和决定,而色度(即色调和色饱和度)由三基色分量的比例决定。这样对于任意给定的彩色光  $F$ , 有下述关系:

$$F = R[R] + G[G] + B[B] \quad (1-1)$$

式中  $[R]$ 、 $[G]$ 、 $[B]$  称为三个基色单位;  $R$ 、 $G$ 、 $B$  代表三基色单位的数量,称为色系数,其比例关系将决定  $F$  的色度,量值大小决定  $F$  的亮度。

式(1-1)称为配色方程,式中的三色系数是通过经典的配色实验得到的,配色实验的简化模型如图 1-5 所示。

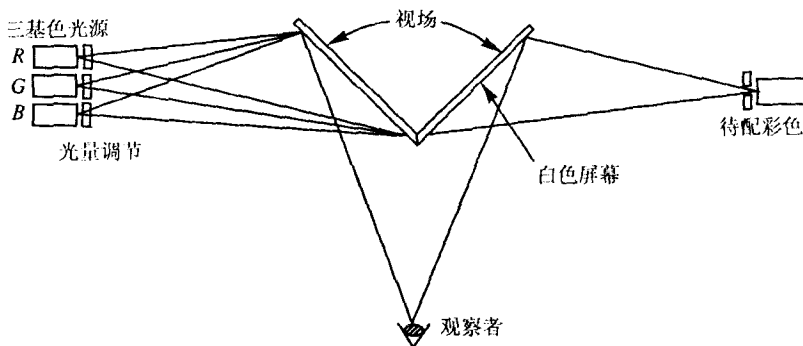


图 1-5 配色实验原理图

在实验中用两块互相垂直的白色屏幕,它们对任何波长的光波几乎全部反射。这样的正交屏幕将人眼视场分成两等份,在左半视场投射红、绿、蓝三基色光,右半视场投射待配彩色光。调节光亮调节器即调节方程式(1-1)中的  $R$ 、 $G$ 、 $B$  三色系数,直到由三基色光混合得到的彩色与待配彩色光完全相同,此时整个视场都呈现待配彩色光,记录光亮调节器的刻度就得到  $R$ 、 $G$ 、 $B$  三色系数,即三基色的混合比例。

要混配出  $E_w$  需要红、绿、蓝三色光通量之比为  $1 : 4.5907 : 0.0601$ ,于是规定三基色单位  $[R]$ 、 $[G]$ 、 $[B]$  光通量分别为  $1$ 、 $4.5907$ 、 $0.0601$  使配出  $E_w$  时  $R=G=B$ ,  $E_w$  为标准白色光。

在实验中光亮调节器调节的是光通量。光通量是按人眼的亮度感觉来度量光的辐射功率的物理量,它在电视屏幕(散射面)上与亮度之间呈正比关系,因此在电视技术中常用光通量来表示亮度。

在配色实验中发现,要配出某些高饱和度的谱色光(即单色光),要将三基色中某一基色移到待配色一边才能获得。例如:要配出黄色光时,需将少量蓝基色光移到待配黄色光一侧,另一侧用红色光和绿色光相混合,才能得到满意的效果,即:

$$F + B[B] = R[R] + G[G]$$

或

$$F = R[R] + G[G] - B[B]$$

式中“ $-$ ”表示该项需加到欲配光一侧。在归一化的式(1-1)配色方程中, $B$ 为负值。

混配出单位辐射功率、波长为  $\lambda$  的单色光所需要的三个基色光的单位数，称为分布系数，分别用  $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 、 $\bar{b}(\lambda)$  表示。单位辐射功率的单色光的配色方程为：

$$F(\lambda) = \bar{r}(\lambda)[R] + \bar{g}(\lambda)[G] + \bar{b}(\lambda)[B]$$

在只研究色度的情况下，将三色分布系数作归一化处理，即仅考虑它们之间的比例关系。

设  $m=R+G+B$  ( $m$  称为色模) 则  $r$ 、 $g$ 、 $b$  分别为：

$$r = R/m; \quad g = G/m; \quad b = B/m$$

式中  $r$ 、 $g$ 、 $b$  称为相对系数。

显然  $r+g+b=1$ 。所以，只要知道其中的两个就可以得到色度。于是，各种彩色光可以采用二维表示法，通常称为色度图。在  $R$ 、 $G$ 、 $B$  计量方式中用  $r-g$  直角坐标系来表示，国际照明委员会 (CIE) 按“标准观察者”测定的配色实验结果绘制的  $R$ 、 $G$ 、 $B$  计色方式的色度图如图 1-6 所示。图中  $E$  为等能标准白光。

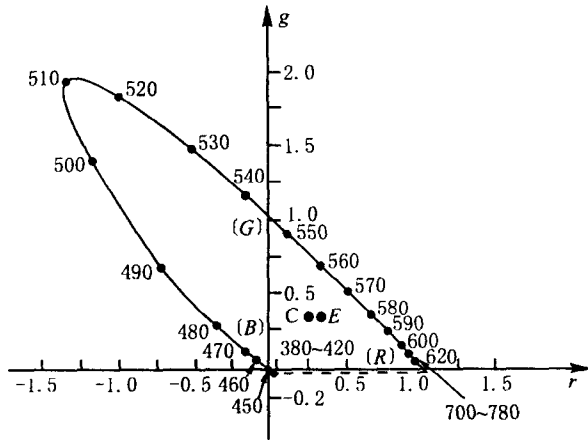


图 1-6 R、G、B 色度图

在色度图中，所有单色光都在舌形曲线上，既可以用它的波长来表示，又可以用色度坐标来表示，该曲线称为谱色曲线，这些光称为谱色光。

图 1-6 中舌形曲线本身并不是闭合的， $[R]$ 、 $[B]$  两点直接相连后，把舌形曲线封闭， $[R]$ 、 $[B]$  线上各点是由  $[R]$  和  $[B]$  按不同比例混配成的非谱色。在封闭曲线内部则都是混合色，即非谱色。非谱色只能用坐标表示，不能用一定的波长表示。封闭曲线的重心坐标为  $(1/3, 1/3)$ ，表示等能标准为白光  $E$ 。在封闭曲线内，坐标越靠近舌形曲线的颜色，其色饱和度越高。在封闭曲线内部任意选取三顶点构成三角形，则三角形及其内部各点都可由三顶点作为基色混配得到，而三角形以外各点都不能由该三基色配出。因此在选取显像三基色时，希望得到的三角形面积尽可能大，这样配出的颜色就更加丰富。

在  $R$ 、 $G$ 、 $B$  计色方式中两种彩色光进行复合时可以通过彩色合成得到，例如，两种彩色光分别为：

$$F_1 = R_1[R] + G_1[G] + B_1[B]$$

$$F_2 = R_2[R] + G_2[G] + B_2[B]$$

它们的合成彩色光为：

$$F_{1+2} = (R_1 + R_2)[R] + (G_1 + G_2)[G] + (B_1 + B_2)[B]$$

这表明合成彩色光各基色分量的色系数等于各种彩色光的相应基色分量色系数之和。

利用相对色系数，麦克斯韦 (MAXWELL) 首先创立了计色三角形，其特点是表示形式简单而直观。麦克斯韦计色三角形如图 1-7 所示，它是一个等边三角形，三个顶点分别代表单位红基色 [R]、单位绿基色 [G] 和单位蓝基色 [B]，而且从顶点到对应边的垂线长度被规定为 1。若令三角形内任意一点 P 到红、绿、蓝三顶点所对应的三边的距离分别为  $r, g, b$  则不难证明  $r+g+b=1$ 。这就是计色三角形的色度坐标，一定的  $r, g, b$  表示一定的色度。显然，标准白光 E 色度坐标对应计色三角形的重心 W 点，因为该点坐标为  $r = 1/3, g = 1/3, b = 1/3$ 。利用计色三角形可以直观地表示彩色合成时的色度关系。

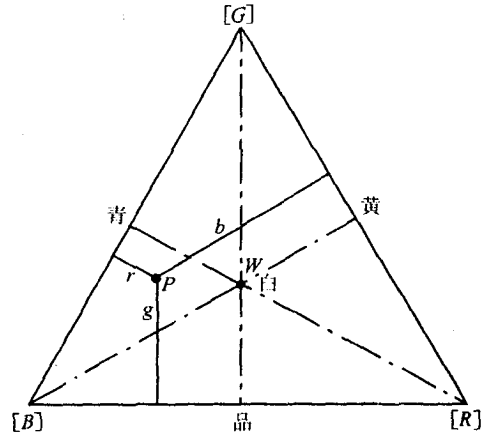


图 1-7 麦克斯韦计色三角形

例如沿 [R][G] 边表示由红色和绿色合成的彩色，此边的中点为黄色，其色度坐标为： $r = 1/2, g = 1/2, b = 0$ 。同样，橙色在黄色与红色的中间，则橙色的色度坐标为： $r = 3/4, g = 1/4, b = 0$ 。同样品色在 [R][G] 边的中点，其坐标为： $r = 1/2, g = 0, b = 1/2$ 。青色在 [B][G] 边的中点，坐标为： $r = 0, g = 1/2, b = 1/2$ 。穿过 W 点的任一条直线连接三角形上的两个点，该两点所代表的彩色相加可得到白色。通常把相加后可形成白色的两种彩色称为互补色，例如，图中表示的红与青、绿与品、蓝与黄皆为互补色。由 W 点到计色三角形边上的任一线段上，均为同一色调，饱和度由 0 渐增至 100%。

上述计色三角形中色度分布的依据是：三角形中任意两点彩色的合成色，其位置在这两点连线上，距两点的距离与这两点光的色模成反比。

配色实验及 R、G、B 计色方式中，采用汞光谱线中的三个单色光 R、G、B 作为三基色，亦称物理三基色。三基色物理意义比较明确，但在定量计算时比较复杂，三色分布系数中有正有负，容易出错。另外，谱色轨迹不全在第一象限内，作图不便。其次在 R、G、B 计色制中的色度图上不能表示亮度。为了克服这些缺点，国际照明委员会 (CIE) 规定了 X、Y、Z 计色制，即 CIE 计色制。

要克服 R、G、B 计色制的缺点，X、Y、Z 计色制靠下列条件为前提作为保证：

- (1) 三色系数 X、Y、Z 均为正数；
- (2) 合成彩色的亮度仅由 Y 项决定，色度仍由三色系数 X、Y、Z 的比例确定；
- (3) 当  $X=Y=Z$  时，混配出标准 E 白光。

由于在 R、G、B 计色制中，F 的光通量为  $|F| = m\{r[R] + g[G] + b[B]\} = m\{r + 4.5907g + 0.0601b\}$  即三者光通量之和。在 X、Y、Z 计色制中，根据条件 (2)，[X] 和 [Z] 的光通量应为 0，X 和 Z 合成光通量也应为 0，所以 [X] 和 [Z] 在 R、G、B 计色制中的连线应是光通量为 0 的轨迹，有  $r + 4.5907g + 0.0601b = 0$  代入  $b = 1 - r - g$  得：

$$0.9399r + 4.5306g + 0.0601 = 0 \quad (1-2)$$

为了充分利用第一象限的面积，[X]、[Y] 的连线用波长为 640 nm ~ 700 nm 的这一段近似直线的延长线作为 [X][Y] 边，而波长 640 nm 点的 R、G、B 色度坐标为： $r = 0.9797, g = 0.0205, b = -0.0002$  波长 700 nm 点的 R、G、B 色度坐标为： $r = 1, g = 0, b = 0$  所以 [X][Y] 边的

直线方程为：

$$(r - 0.9797)/(1 - 0.9797) = (g - 0.0205)/(0 - 0.0205)$$

经整理后得：

$$r + 0.99g - 1 = 0 \tag{1-3}$$

而[Y]、[Z]边选择的自由度较大，CIE 计色制规定选用方程为：

$$1.45r + 0.55g + 1 = 0 \tag{1-4}$$

联立方程式(1-2)、(1-3)、(1-4) 求出[X]、[Y]、[Z] 的坐标为：

$$\begin{aligned} [X] & (1.2750, -0.2778, 0.0028) ; \\ [Y] & (-1.7393, 2.7673, -0.028) ; \\ [Z] & (-0.7431, 0.1409, 1.6022) . \end{aligned} \tag{1-5}$$

XYZ 三基色称为计算三基色，在 R、G、B 色度图中的位置见图 1-8。从图中可以看出 由于[X]、[Y]、[Z]三点都处于 RGB 色度图外，因此这是一组虚基色，但仍可以认为每一计算基色是由物理三基色按一定比例混配得来，根据计算得出：

$$\begin{bmatrix} [X] \\ [Y] \\ [Z] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4185 & -0.0912 & 0.0009 \\ -0.158 & 0.2524 & -0.025 \\ -0.828 & 0.0157 & 0.1786 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [R] \\ [G] \\ [B] \end{bmatrix} \tag{1-6}$$

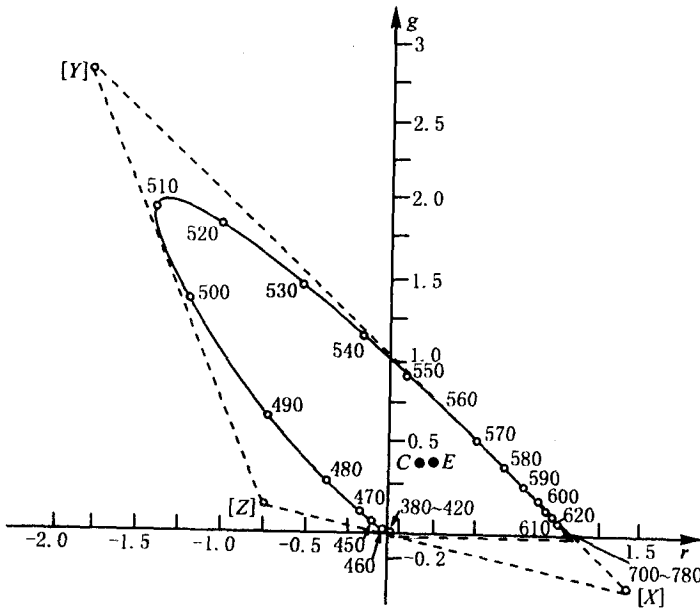


图 1-8 计算三基色[X]、[Y]、[Z]在 RGB 色度图中的位置

由于在 R、G、B 计色制中  $F=R[R]+G[G]+B[B]$  而在 X、Y、Z 计色制中  $F=X[X]+Y[Y]+Z[Z]$ ，由此式可以得出 X、Y、Z 计色制的三色系数 X、Y、Z：

$$\begin{bmatrix} [X] \\ [Y] \\ [Z] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.7689 & 1.7518 & 1.1302 \\ 1.0000 & 4.5907 & 0.0601 \\ 0.0000 & 0.0565 & 5.5943 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [R] \\ [G] \\ [B] \end{bmatrix} \tag{1-7}$$

与 R、G、B 计色制一样，色模  $m' = X + Y + Z$ ，则相对系数为： $x = X / m'$ 、 $y = Y / m'$ 、 $z = Z / m'$

显然  $x + y + z = 1$  这样可以用 R、G、B 计色制相同的方法绘制 X、Y、Z 计色制的  $x-y$  坐标系色度图，如图 1-9 所示。显然这时的色度图已经全部在第一象限内。

图 1-9 中 XYZ 色度图内部画出了常用标准光源的相对位置。

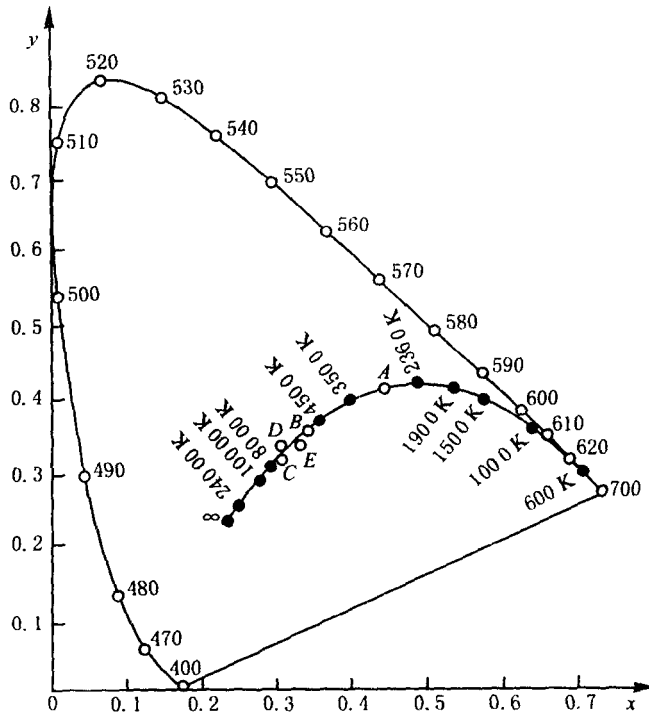


图 1-9 X、Y、Z 色度图

### 1.1.6 彩色的重现

人眼色感具有三基色特性，根据前面所讲的三基色原理，几乎自然界中所有的彩色都能用三种基本彩色光混合配出，且混配出彩色光的色感与原彩色光的色感相同。所以，在摄取景物时，采用具有一定光谱响应的三只摄像管分别摄取三基色光分量信号，经过适当地处理和传送，再通过重现设备按照摄取时的比例进行混合，就可以实现景物色感的正确重现（色还原）。

正确重现彩色色感是电视系统最基本的要求。景物的重现目前大多数是用显像管来实现的，这就要求显像管正确地选择显像三基色以确保彩色的正确重现。

显像管是利用空间混色原理实现彩色重现的。它选用红、绿、蓝作为显像三基色，而显像三基色由彩色荧光粉确定。根据前面的介绍可知，选择显像三基色应遵循以下原则：一方面由显像三基色构成的三角形面积应充分利用舌形曲线的面积，即重现彩色范围充分大；另一方面显像基色的亮度应足够大。

由于高亮度和重现彩色范围大是相互矛盾的，为了提高彩色重现的效果往往牺牲一定的色域范围来保证足够的重现亮度，即在一定的重现彩色范围下，尽量设法提高亮度。

图 1-10 表示了彩色电视色度重现的范围。

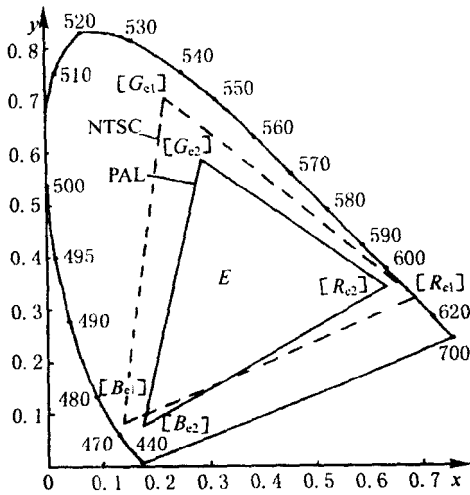


图 1-10 彩色电视重现色度的范围

图 1-10 中分别表示了早期 NTSC 制和 PAL 制选用的显像三基色和重现色域三角形（分别选用 C 和 D<sub>65</sub> 标准白光）。由于在三角形以外分布的彩色光是高饱和度彩色光，在现实生活中是极其少见的，所以这两种重现色域三角形都能重现自然界中绝大多数彩色光。尤其是 [R][G] 边比较靠近谱色轨迹，使得较常见的引起美感的红、橙、黄、绿等颜色能够重现较高的饱和度。

由图 1-10 还可以看出，PAL 制比 NTSC 制重现色域略小，但 PAL 制牺牲了色域范围而提高了重现亮度，所以颜色比较鲜艳。因此 NTSC 制后来也改用 PAL 制三基色及 D<sub>65</sub> 标准白光。一旦选定了显像三基色 [R<sub>e</sub>]、[G<sub>e</sub>]、[B<sub>e</sub>] 以及参考白光，根据 1〔流明〕光

通量单位）白光的配色方程为： $F_c = 1[R_e] + 1[G_e] + 1[B_e]$  可以得出：

$$\begin{bmatrix} R_e \\ G_e \\ B_e \end{bmatrix} = [A_e] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (1-8)$$

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = [A_e]^{-1} \begin{bmatrix} R_e \\ G_e \\ B_e \end{bmatrix} \quad (1-9)$$

根据式 (1-8)、(1-9) 就可以计算它们之间的关系。

在早期 NTSC 制中，选 C 作为标准白光，并根据选定的荧光粉，得到：

$$A_e = \begin{bmatrix} 1.910 & -0.532 & -0.288 \\ -0.985 & 1.999 & -0.028 \\ 0.058 & -0.118 & 0.987 \end{bmatrix}, \text{ 也就有 } A_e^{-1} = \begin{bmatrix} 0.067 & 0.174 & 0.200 \\ 0.299 & 0.587 & 0.114 \\ 0.000 & 0.066 & 1.116 \end{bmatrix}.$$

所以，NTSC 的亮度方程为：

$$Y_{NTSC} = 0.299 R + 0.578 G + 0.114 B \quad (1-10)$$

用类似的方法可以得出 PAL 制的亮度方程为：

$$Y_{PAL} = 0.222 R + 0.707 G + 0.071 B \quad (1-11)$$

后来所有用于电视广播的彩色电视系统都采用 PAL 制三基色及 D<sub>65</sub> 白光，但在实际应用中仍沿用起步较早的 NTSC 制彩色电视的亮度方程（或简称亮度公式），通常简写为：

$$Y = 0.30 R + 0.59 G + 0.11 B \quad (1-12)$$

粗看起来，所采用的亮度方程与三基色及标准白光不符，会引起亮度误差，但实际上，根据

本章 1.4 节关于恒定亮度误差的分析，这并不会增加亮度误差<sup>〔1〕</sup>。

### 1.1.7 摄像光谱响应曲线

分布色系数是特定条件下的色系数，所以  $X, Y, Z$  三基色和  $R_e, G_e, B_e$  三基色的分布色系数  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  和  $\bar{r}_e, \bar{g}_e, \bar{b}_e$  可分别利用式 (1-7) 和式 (1-8) 得到。即在式 (1-7) 中将  $R, G, B$  换成  $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$  将  $X, Y, Z$  换成  $x, y, z$ ；在式 (1-8) 中将  $X, Y, Z$  换成  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  将  $R_e, G_e, B_e$  换成  $r_e, g_e, b_e$ 。

对于 PAL 制荧光粉和  $D_{65}$  标准白光，式 (1-8) 中的矩阵参数为：

$$A_e = \begin{bmatrix} 3.0634 & -1.3934 & -0.4758 \\ -0.9693 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0679 & -0.2288 & 1.0691 \end{bmatrix}$$

于是可先通过式 (1-7) 由  $\bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$  计算出  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  再通过式 (1-8) 由  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$  计算出 PAL 制  $r_e, g_e, b_e$  进一步画出 PAL 制显像三基色混色曲线  $\bar{r}_e(\lambda), \bar{g}_e(\lambda), \bar{b}_e(\lambda)$  如图 1-11 所示。

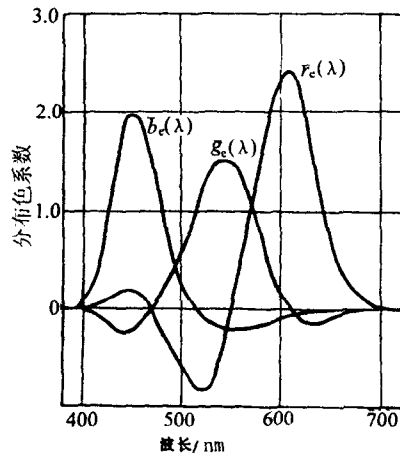


图 1-11 显像三基色混色曲线

混色曲线表明，要配出单位功率的某一波长光，需要相应的三基色单位数  $\bar{r}_e, \bar{g}_e, \bar{b}_e$ 。因此要配出任意功率波谱  $\varphi(\lambda)$  的光，所需三基色单位数分别为：

$$\left. \begin{aligned} R_e &= \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{r}_e(\lambda) d\lambda \\ G_e &= \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{g}_e(\lambda) d\lambda \\ B_e &= \int_{380}^{780} \varphi(\lambda) \bar{b}_e(\lambda) d\lambda \end{aligned} \right\}$$

摄像端对功率波谱为  $\varphi(\lambda)$  的光分色时，必须使三个色系数之比  $R_0 : G_0 : B_0 = R_e : G_e : B_e$ 。以正确传送彩色这就需要分色曲线也称为光谱响应曲线之比即  $r_0(\lambda) : g_0(\lambda) : b_0(\lambda)$  与混色曲线之比  $\bar{r}_e(\lambda) : \bar{g}_e(\lambda) : \bar{b}_e(\lambda)$  相等，即分色曲线与混色曲线成比例（或称匹配、一致）。

〔1〕 左庆丰，电视技术北京，CN11-2123/TN 1996 年 10 期

实际上 将上式中  $R_e, G_e, B_e$  换成  $R_0, G_0, B_0, \bar{r}_e(\lambda), \bar{g}_e(\lambda), \bar{b}_e(\lambda)$  换成  $\bar{r}_0(\lambda), \bar{g}_0(\lambda), \bar{b}_0(\lambda)$  就体现了摄像时的分色。传送  $D_{65}$  白光时  $R_e = G_e = B_e$  且  $\varphi(\lambda)$  近似于常数 因此 三条曲线 (混色曲线或分色曲线) 的积分面积近似相等。

## 1.2 图像传送原理和电视扫描技术

### 1.2.1 电视系统顺序传像原理

从前面的介绍可知,彩色光要由三个基本参量来描述,即亮度 ( $L$ )、色调 ( $H$ ) 和色饱和度 ( $S$ )。景物的空间几何坐标用  $x, y, z$  表示,连续活动图像的时间坐标用  $t$  表示。这样自然界任何景物都可以用下列方程组表示:

$$\left. \begin{aligned} L &= f_L(x, y, z, t) \\ H &= f_H(x, y, z, t) \\ S &= f_S(x, y, z, t) \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

任何图像都是由大量的基本单元组成的,这些基本单元称为像素。单位面积上像素数目越多则图像越清晰逼真。在我国的电视标准中一幅画面大约要包含 40~50 万个像素。每个像素又要用式 (1-13) 来描述。可见,图像的信息容量是非常庞大的,同时利用分立信道并行传送这些信息在技术上是无法实现的。如果将图像分解后的像素按一定的顺序转变成电信号,依次传送每个像素的三个参量,在接收端也按相应顺序将各个位置的像素恢复为光信号,只要轮换的速度足够快,就能恢复原整幅图像的感觉。

这种传送方式实际是基于人眼的视觉惰性。当一定强度的光突然作用于人眼时,并不能瞬间形成清晰稳定的主观感觉。当光消失时,主观亮度感觉也不是瞬间消失,即人眼的主观亮度感觉滞后于光的出现和消失,这就是人眼的视觉惰性,这种惰性是比较短暂的。如果光脉冲的出现和消失即闪烁速度不够高时,人就能够感觉到一明一暗的闪烁感觉,但如果重复频率提高到一定值以上,人就感觉不到是脉冲光源。这一重复频率的临界值称为临界闪烁频率,典型值为 46 Hz,它还与很多因素有关,如:屏幕亮度、图像内容的变化、观看条件及发光物体的余辉特性等。

顺序传送系统必须迅速而且准确,每个像素一定要在轮到时才被发送和接收,而且发送和接收每个像素的几何位置要一一对应。这种方式称为收、发端同步工作,简称同步。如果不能保证同步工作,即收端画面的每行或每幅画面的像素相对于发端画面将发生错位,导致重现画面发生畸变乃至不可分辨。因此,同步是电视系统中基本而又重要的特殊问题。

### 1.2.2 电视扫描与同步

#### 1. 光电转换原理

(1) 摄像:在电视系统中,实现光/电转换的器件是摄像管,其中主要是视像管(光电导摄像管)。光电靶很薄,具有内光电效应,它在无光照时有极高的电阻值。当受到光照射时电阻率下降,变化量与光通量成正比,并且这种电阻率的变化只体现在光电靶的深度方向上,而不沿横向扩散。被摄景物通过摄像机的光学镜头恰好在摄像管光电靶面上成像。由于光像各部分的亮度不同,使靶上各部分的电导率也不同,则“光像”变成“电像”。通过扫描,在负载电阻

上就依次得到了与图像上各点亮度对应的电信号。

(2) 显像：显像管是实现电 / 光转换的器件。电视摄像机输出的电视图像信号传送到显像管的阴（控制）栅极，并由此去调制电子束，从而改变其携带的能量，使受其轰击的荧光屏的发光强弱受到图像信号的控制。电子束受到偏转场的作用进行扫描，扫描规律与摄像管中电子束的扫描规律同步，在屏幕上显示图像的各像素都正比于所摄取图像各对应像素的亮度，实现图像的重现。

## 2. 彩色图像的摄取与重现

通过摄像机的分光系统，将景物的彩色光分解成三基色光，分别用三只摄像管摄取，获得三个相应的基色信号，然后经过处理形成一个复合信号传输。接收端将接收到的复合信号进行处理，恢复成三个基色信号，分别轰击对应的三基色荧光粉。荧光点的亮度分别与被摄取景物相应像素的亮度成正比，在荧光屏上利用空间混色原理去重现发端的彩色图像。

### 1.2.3 电视扫描原理

在电视系统中，图像传输的过程实际是图像分解和复合的过程，电视图像传输原理如图 1-12 所示。这个过程是通过电子束的扫描来实现的。在发送端通过电子束的扫描实现图像的分解，即空间图像信号转换为时间序列信号，也就是空间坐标转换为时间坐标；在接收端通过电子束的扫描实现图像的复合，即时间序列信号转换为空间图像信号，也就是时间坐标转换为空间坐标。

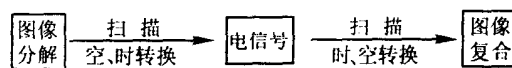


图 1-12 电视图像传输过程

扫描的方式很多，电视系统采用匀速直线扫描，其中又包括隔行扫描和逐行扫描。

#### 1. 逐行扫描

在摄像管与显像管外部都装有行与场两对偏转线圈，线圈中分别流过行、场锯齿波扫描电流，同时产生水平方向与垂直方向的偏转磁场。在这两个偏转磁场的共同作用下，电子束就在摄像管的光敏靶或显像管的荧光屏上作匀速直线扫描（见图 1-14）。一行紧跟一行的扫描方式称为逐行扫描。扫描轨迹称为扫描光栅。逐行扫描的行、场扫描电流如图 1-13 所示。图中下标 H 代表“行”，V 代表“场”。

当行扫描锯齿电流流过行偏转线圈时，电子束将在水平方向上受到偏转力，因而产生水平方向的扫描（也称行扫描）。扫描电流在  $t_1$  到  $t_2$  期间线性上升，电子束在水平方向上受到相应（自左向右）的作用力，从左向右扫描，这一扫描过程称为行正程扫描，所需时间为行正程时间，用  $T_{Hr}$  表示。当行扫描电流到达最大值（ $t_2$  处）时在短时间内迅速下降到  $t_3$  状态，因此电子束受到相应的作用力，快速回到左端，这一扫描过程称为行逆程扫描，所需时间为行逆程时间，用  $T_{Hr'}$  表示，即  $T_{Hr'} \ll T_{Hr}$ 。来回一次扫描时间称为行周期，用  $T_H$  表示，则  $T_H = T_{Hr} + T_{Hr'}$ 。行扫描周期的倒数就是行扫描频率（简称行频）用  $f_{Hr}$  表示。

当场扫描锯齿电流流过场偏转线圈时，电子束将在垂直方向上受到偏转力，因而产生垂直方向的扫描（也称场扫描）。扫描电流在  $T_V$  期间线性下降，电子束在垂直方向上受到相应的作用力，因而也从上向下扫描，这一扫描过程称为场正程扫描，所需时间为场正程时间，用  $T_{Vr}$  表

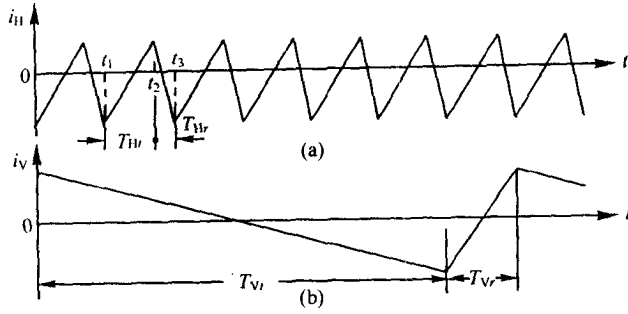


图 1-13 逐行扫描的行、场扫描电流波形

(a) 行扫描锯齿电流 (b) 场扫描锯齿电流

示。当场扫描电流到达最小值时在短时间内迅速上升到最大值，因此电子束受到相应的作用力，快速回到上端，这一扫描过程称为场逆程扫描，所需时间为场逆程时间，用  $T_{Vr}$  表示，即  $T_{Vr} \ll T_V$ 。来回一次扫描时间称为场周期，用  $T_V$  表示，则  $T_V = T_{Vr} + T_V$ 。场扫描周期的倒数就是场扫描频率（简称场频）用  $f_V$  表示。

当行、场扫描电流同时作用时，电子束就在水平偏转力和垂直偏转力的合力作用下进行扫描。由于电子束的水平运动速度远大于垂直运动速度，即  $f_H \gg f_V$ ，所以在屏幕上出现的是稍为倾斜的水平直线光栅如图 1-14 所示。

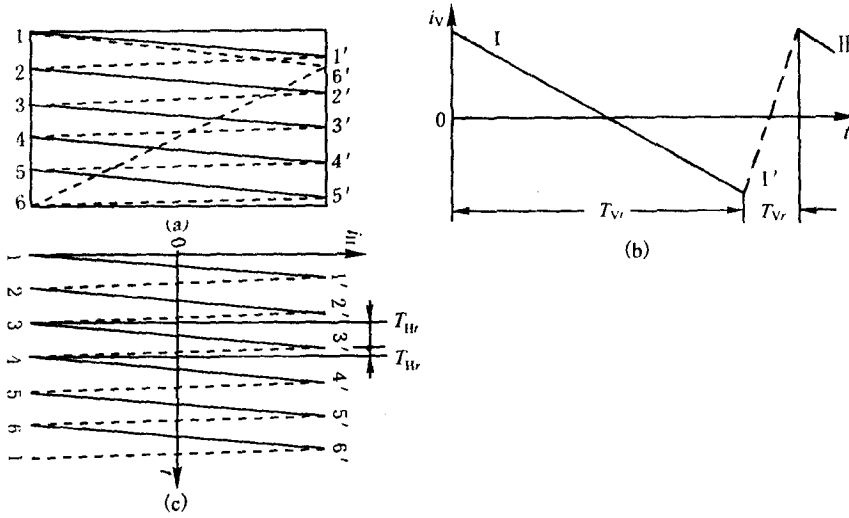


图 1-14 逐行扫描的光栅及行、场扫描电流波形

(a) 逐行扫描的光栅 (b) 场扫描电流波形 (c) 行扫描电流波形

图中画出的是  $T_V = 5T_H$ ,  $T_{Vr} = 1T_H$ ,  $T_V = 6T_H$ ，即一场中有 6 行的逐行扫描光栅。如果一场中包含的行数很多，则光栅倾斜度就会减小，甚至看不出倾斜度，可以近似认为是水平光栅，就像实际电视扫描光栅一样。

为了使得图像清晰而且均匀，在逆程期间不传送图像信号。为此在广播电视技术中，采取的措施是在逆程期间让电子束截止，使之不显示扫描线，以达到消隐。为了获得有效的扫描光

栅，必须使正程时间远大于逆程时间，即要求  $T_{Hr} \ll T_H, T_{Vr} \ll T_V$  并规定  $\alpha = T_{Hr}/T_H$  其中  $\alpha$  称为行扫描逆程系数，一般为 18% 左右。还规定  $\beta = T_{Vr}/T_V$  其中  $\beta$  称为场扫描逆程系数，一般为 8% 左右。

在逐行扫描方式中，由于每一场的扫描光栅都起始于屏幕的左上角，终止于右下角，并且要求光栅具有很好的重复性，因此每场势必包含若干完整的扫描行，即  $T_V = ZT_H$  或  $f_H = Zf_V, Z$  为扫描行数。在人眼与屏幕保持一定距离的情况下，如果行数足够多，将分辨不出行结构，只能看见一个均匀发光的面。若电子束受图像信号的调制，则屏幕上就显示出了和发端所摄取景物相同视觉效果的一幅重现图像。

## 2. 隔行扫描

(1) 隔行扫描的优越性：当与人眼相隔一定距离的两个黑点靠近到一定程度时，人眼就分辨不出有两个黑点存在，而只感觉到是连在一起的一个黑点，这说明人眼分辨景物细节的能力有一极限值。人眼对被观察物体上能分辨的相邻最近两点的视角的倒数定义为人眼的细节分辨力。人眼的细节分辨力与物体在视网膜上成像的位置有关，中间分辨能力强，边缘较弱。人眼分辨力较强的视野范围是正前方左右跨度大约  $20^\circ$ ，上下跨度大约  $15^\circ$ 。通常具有正常视力的人，在中等亮度和中等对比度下观察静止物体时视角大约为  $1' \sim 1.5'$  左右。并且人眼对彩色的细节分辨能力远比对亮度细节分辨力低。若人眼对与其相隔一定距离的黑白相间的条纹刚能分辨出黑白差别，则把黑白条纹换成不同的彩色相间的条纹后，就不能分辨出彩色差别来。人眼相对细节分辨能力见表 1-1，可见人眼分辨景物彩色细节的能力很差。

表 1-1 人眼对彩色细节的分辨力

不同色彩细节	黑白	黑绿	黑红	黑蓝	绿红	红蓝	绿蓝
相对分辨力	100%	94%	90%	26%	40%	23%	19%

因此彩色电视系统在传送彩色图像时，细节部分可以只传送黑白图像，而不传送彩色信息，这就是利用大面积着色原理节省传输频带的理论依据。

由于扫描行数是在垂直方向上的水平扫描行数，人眼在垂直方向上的清晰视角为  $15^\circ$ ，而人眼的正常分辨力为  $1' \sim 1.5'$ ，则电视系统所需的扫描行数为： $Z = 15 \times 60 / 1.5 \sim 15 \times 60 / 1$ ，即介于 600 到 900 行之间。

根据人眼的视觉特性，若在不产生闪烁感觉和保证有足够清晰度的情况下，场扫描频率必须在 48 Hz 以上，而扫描的行数必须在 500 行以上，根据这些指标计算出的图像信号的频带是很宽的。减小图像频带的方法，一是降低场频，二是减少行数，但这样又会分别引起闪烁现象和图像清晰度下降，于是提出了隔行扫描的扫描方案。

在逐行扫描方式中，一帧（亦称一幅）电视图像要在一个场扫描周期内完成，而隔行扫描是将一帧电视图像分成两场进行扫描，第一场扫出光栅的第 1, 3, 5... 奇数行 第二场扫出第 2, 4, 6... 偶数行，这样每一帧图像经过两场扫描，所有像素就可以全部扫完。

在隔行扫描方式中，引入了帧频这一概念。在逐行扫描方式下场频和帧频是相等的，电子束完成场周期的扫描，就可将一幅图像全部扫完，因此，帧周期 ( $T_F$ ) 等于场周期 ( $T_V$ )。在隔行扫描方式中，一个场周期电子束仅扫描了整幅图像的一半，奇偶两场都扫完才能将整幅图像全部扫描。因此，帧周期 ( $T_F$ ) 等于两倍场周期 ( $T_V$ )，即场频等于两倍帧频。

我国现行每秒 25 帧图像 每秒 50 场，亮度闪烁现象不明显。隔行扫描可以使帧频下降为场频的一半，行频也减低到逐行扫描时的一半，结果使信号频带宽度也减少一半，而每帧扫描的行数不变，这样就达到既保持了逐行扫描的清晰度，又降低了图像频带的目的。

(2) 隔行扫描光栅的形成：隔行扫描光栅行结构比逐行扫描方式复杂，为了讨论简便起见，把行、场逆程时间都设为零。图 1-15 画出了 11 行隔行扫描光栅的扫描过程示意图。如图所示，奇数场扫描奇数行，偶数场扫描偶数行，偶数场的光栅应刚好落在奇数场光栅的中间，两场光栅恰好均匀镶嵌，构成一幅均匀光栅，两场扫描行数共为 11 行。

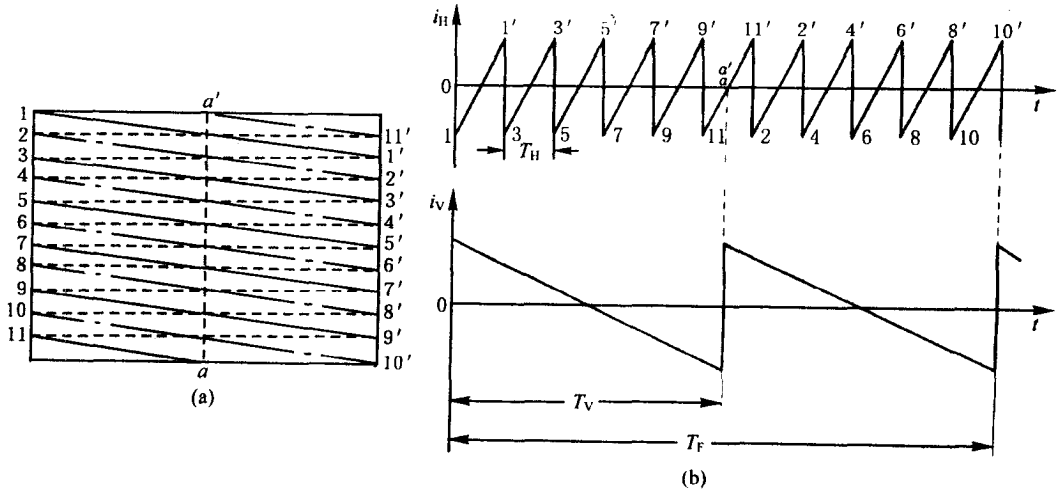


图 1-15 隔行扫描光栅和扫描电流波形

(a) 隔行扫描光栅 (b) 行、场扫描锯齿电流

两场光栅均匀交错是对隔行扫描的基本要求，否则垂直清晰度将大为下降，隔行扫描方式满足的条件如下两条：

下一帧扫描起始点应与上一帧起始点相同 以保证各帧扫描光栅重叠。

相邻两场扫描光栅必须均匀镶嵌，以获得最高清晰度。

第一条要求每帧的扫描行数必须为整数，若在各场扫描电流都一样的前提下满足第二条，则每场均需包含半行，每帧应为奇数行。例如 我国现行的 625 行隔行扫描方式，每场的扫描行数为 312.5 行。

从理论上还存在偶数行隔行扫描方式，但为使奇数场与偶数场的光栅镶嵌，场扫描电源振幅必须两场不同，这样的扫描实现在技术上比较困难，设备复杂。所以，偶数行隔行扫描方式未被采用。

(3) 隔行扫描的缺点：既然隔行扫描可减少图像信号频带，是否可采用隔多行扫描来进一步减少图像信号频带？回答是否定的，因为隔行扫描存在以下缺点，而且隔行数越多，这些缺点越严重。

**行间闪烁效应** 在隔行扫描中整个屏幕亮度是按场频重复的，但每一行的亮度是按帧频重复的，即帧频率低于临界闪烁频率，所以，当观看比较亮的细节时会有闪烁感。隔行数越多这种闪烁效应越严重。

**并行现象** 其一是真实并行：在隔行扫描方式中若两场光栅不能良好镶嵌，严重时两

场光栅会重叠在一起，这就是并行现象，这将导致图像垂直清晰度下降。另外隔行扫描对场扫描电流幅度的稳定性和正程的线性都有较高要求。并且隔行数越多，对这些越敏感。

其二是视在并行：如果被传送图像中的运动物质体在垂直方向上有足够大的速度分量，而且每经一场时间运动物体刚好向下移动一行，则后一场传送的细节与前一场相同。所以当视线随着物体移动时，看起来好像两行变成了一行，这称为视在并行。视在并行也使清晰度下降，隔行数越多产生视在并行所对应的物体垂直方向速度分量越小，图像清晰度降低的可能性越大。

锯齿化现象 当图像中的物体沿水平方向有足够大的速度分量，物体垂直边缘因分场传送会发生在相邻两场光栅中左右错开的锯齿化现象。隔行数越多，错开程度越严重。

### 1.2.4 扫描与同步

#### 1. 扫描的同步

在电视系统中，为了能够正确地重现图像要求收端与发端同步扫描，只要扫描频率相同，起始相位相同，收端就可以重现发端图像，并认为已是同步。当收端、发端的频率与相位不同时，图像将无法正确重现。

(1) 当扫描频率相同、起始相位不同时会引起重现图像畸变。图 1-16(b)、(c) 所示为收发端行场扫描相位不同造成图像畸变的示意图。图 (a) 是待传送的图像；图 (b) 是收发端行扫描相差半行时间造成图像左右分裂；图 (c) 是收发端场扫描相差半场造成图像上下分裂。总之，在频率相同、起始相位不同时，重现图像是稳定的，但被分裂移位造成畸变。

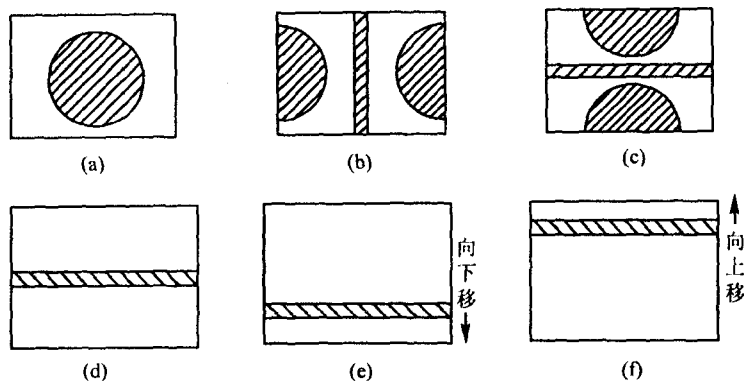


图 1-16 收发端不同步时造成图像的畸变

(a) 发端图像 (b) 相位差为半行时引起图像左右分裂 (c) 相位差为半场时引起图像上下分裂  
(d) 发端图像 (e) 收端场频高于发端 (f) 收端场频低于发端

(2) 扫描频率不相等：当收端行频略高于发端，则发端第一行末的像素将在收端第二行的左侧出现，第二行右侧的像素又将出现在第三行，依次类推。如果收端行频略低于发端，则收端第一行右端将出现第二行左侧的部分图像，第二行右端将出现第三行左侧的部分图像，依次类推，使行逆程在屏幕上显示出来。结果使得重现图像的像素排列与发端不同，并变得混乱，重现图像无法辨认。当收发端场频相差较大时，同样会引起各场像素的混乱。当收发端场频相差较小时，图像将以收发端场频差值频率在屏幕上滚动，如图 1-16(e)、(f) 所示。

由上述可知，收发端扫描同步在电视系统中具有重要意义，若同步得不到保证图像就无法