



计算机图形学

第二章 人眼视觉系统与图形设备

颜波

复旦大学计算机科学技术学院
byan@fudan.edu.cn

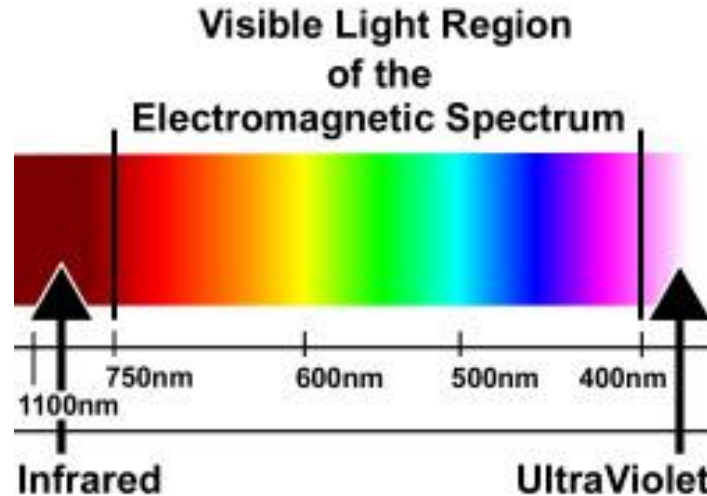
本章概述

- 图形学的几个重要概念
- 人眼视觉系统的频率响应
- 图形设备

2.1 图形学中的一些重要概念

- 颜色视觉
- 图像和像素
- 三角网格模型

颜色视觉

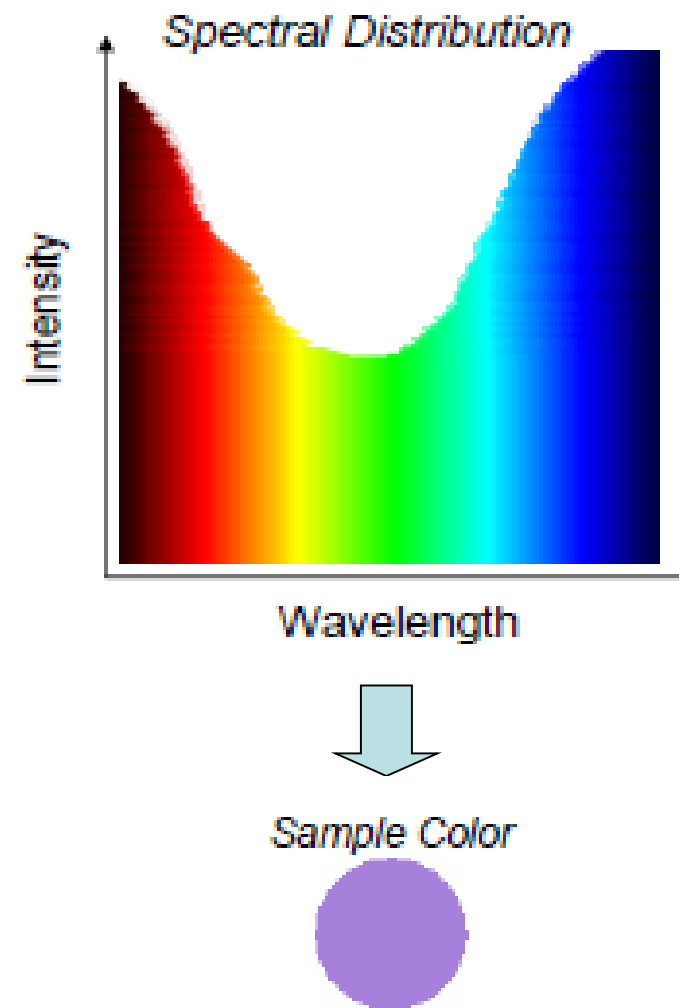


● 什么是颜色？

- 颜色是人眼对不同波长的光的能量的感知：
 - 不同波长的电磁波 (electromagnetic waves) 对应不同的颜色；
 - 人眼能感知到的光称为可见光，其波长范围在 380nm 到 760nm 之间

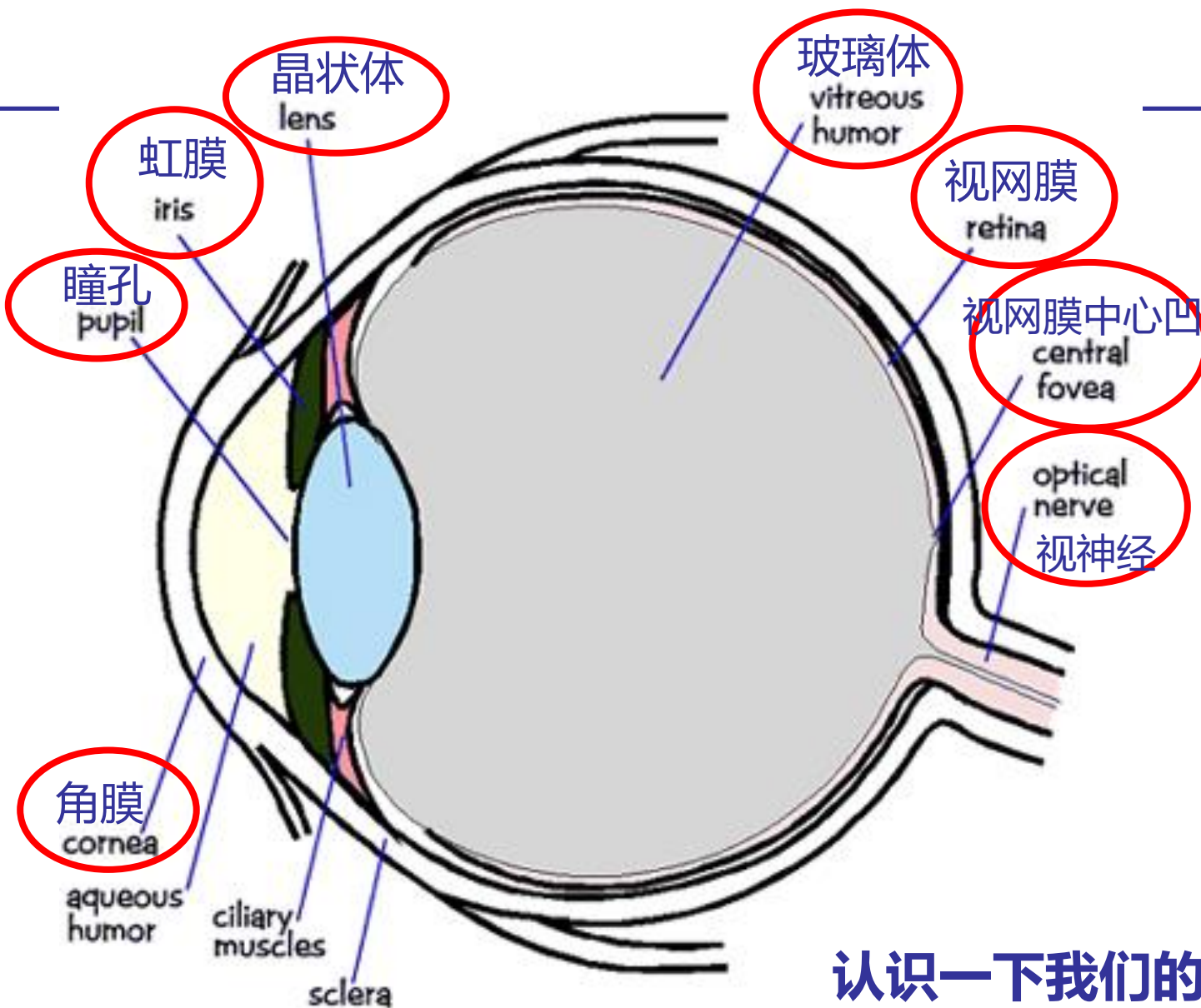
光的谱分布

- “光”是由不同波长的电磁波按照某种能量分布混合叠加而成
 - 例如，“白光”是由所有可见波长的电磁波以相等的强度混合得到的
- 谱分布：光在各个可见波长分量的强度分布函数称为光的谱分布



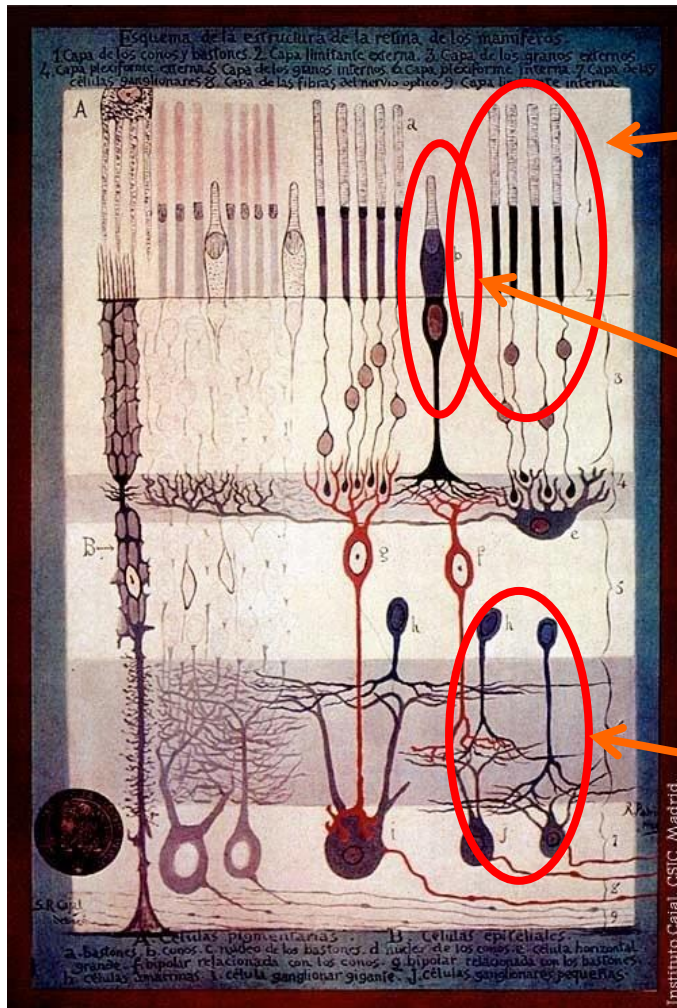
光的谱分布

- 与光类似，颜色也可以使用谱分布函数来进行描述
- 然而，使用谱分布函数来表示颜色，不仅复杂，而且谱分布函数和颜色之间并不是1-1映射
- 实际上，不同的谱分布函数可能对应为同一种颜色，这种现象被称为“异谱同色”



认识一下我们的眼睛
记住这些名词

视网膜——我们的感知器!

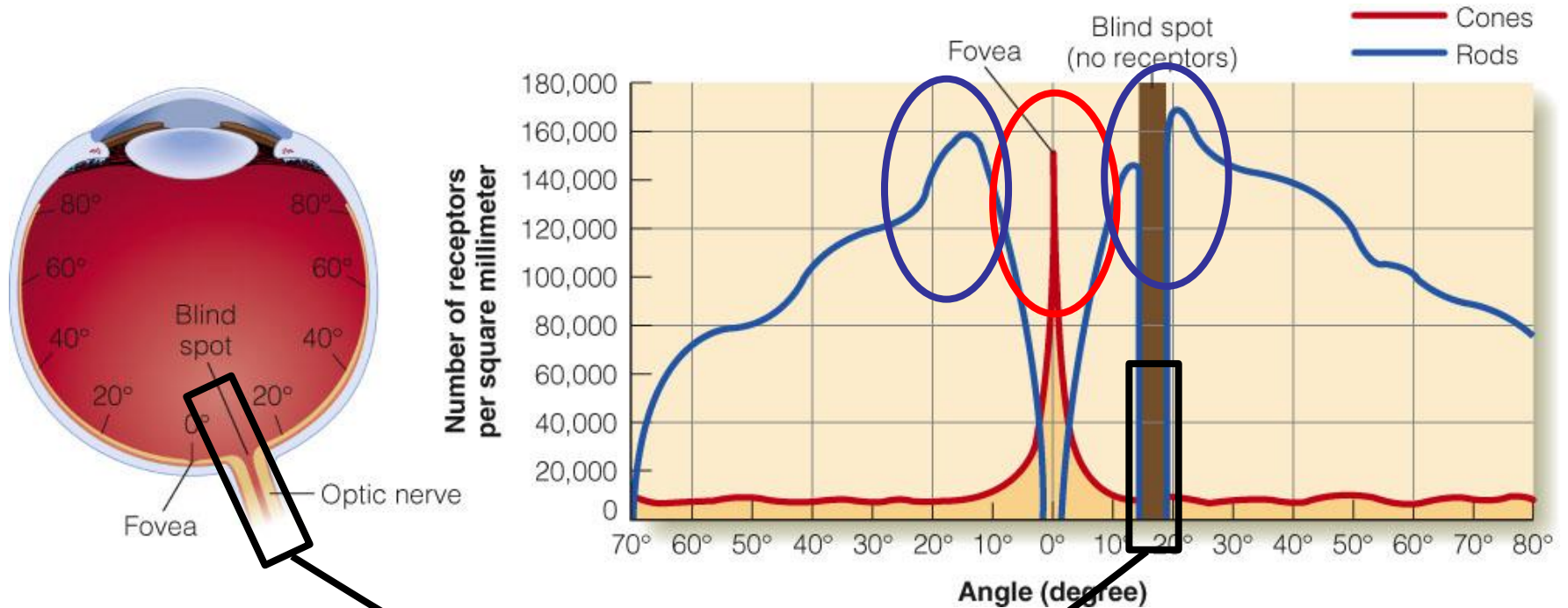


杆状细胞(rod),
对亮度更敏感 (因而在夜间
的视力由杆状细胞主导)

锥状细胞(cone),
感知色彩, 主要分为对红光
敏感, 对绿光敏感, 对蓝光
敏感三类。

神经节细胞(ganglion),
神经节细胞负责将这些细胞
受到的刺激传递给视神经。

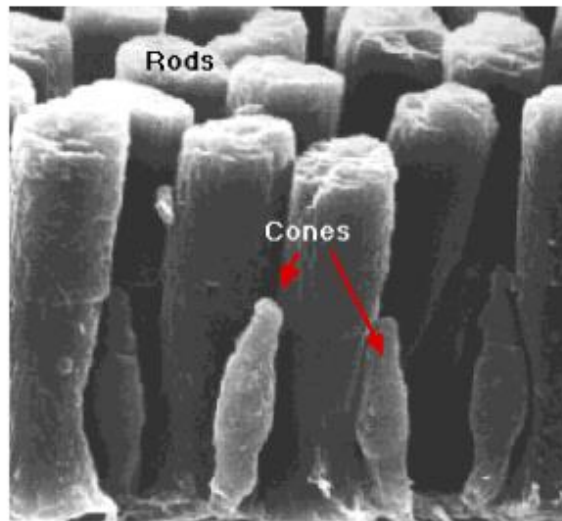
杆状细胞与锥状细胞的密度



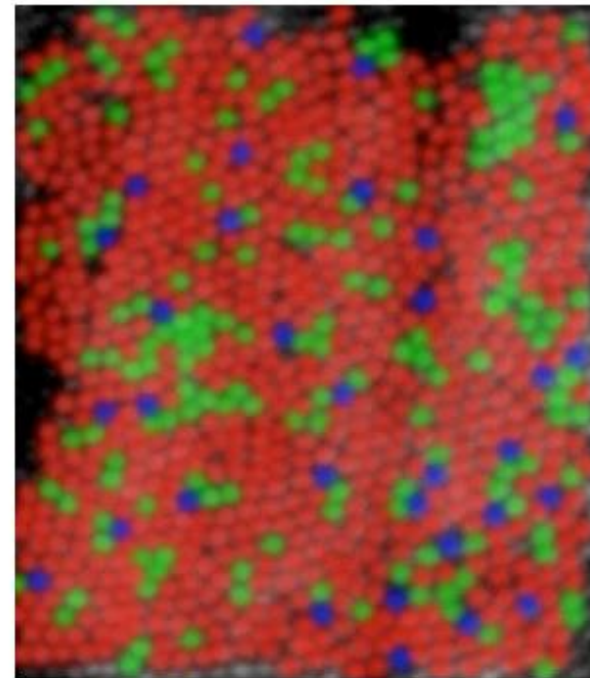
- 右图显示了各种感光细胞在视网膜上的分布。横坐标是相对于视网膜中心凹的角度，纵坐标则是相应的感光细胞数目。
- 其中的红色曲线是锥细胞在视网膜上的分布，我们可以看出锥细胞主要集中在视网膜中心凹处。因而人眼在视野中心处辨色力最强。

为何采用RGB 颜色空间?

- 左图是视网膜组织的显微镜成像图。人眼中大约有1.2亿个杆状细胞与五六百万个锥状细胞。右图中细胞显示的颜色表示它对哪种颜色的光刺激最敏感。



120 million rods
5-6 million cones



R 63% - G 31% - B 6%

Wandell, "Foundations of Vision" (left)
David R. Williams, Univ. of Rochester (right)

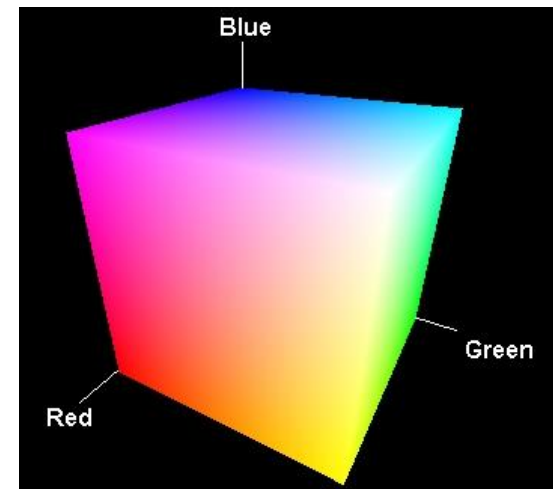
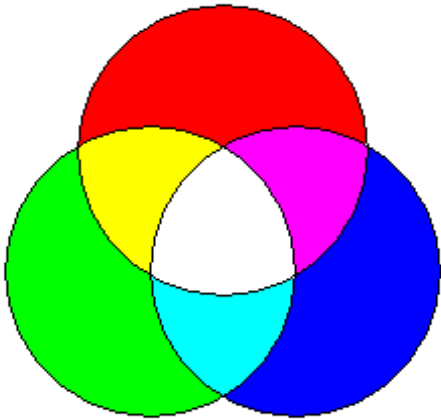
RGB 颜色空间

- 在所有用于表示色彩的颜色空间中，**RGB (红绿蓝)** 颜色空间在计算机图形学中的使用最为广泛：
 - 一种颜色通过三通道向量 (r, g, b) 来表示；
 - 部分常用操作可以转化为对 RGB 三通道分别独立处理；
 - 在计算机中，通常将 r, g, b 三个分量分别规整化为 $[0, 1]$ 内的浮点数；或 $[0, 255]$ 内的8bit无符号整数

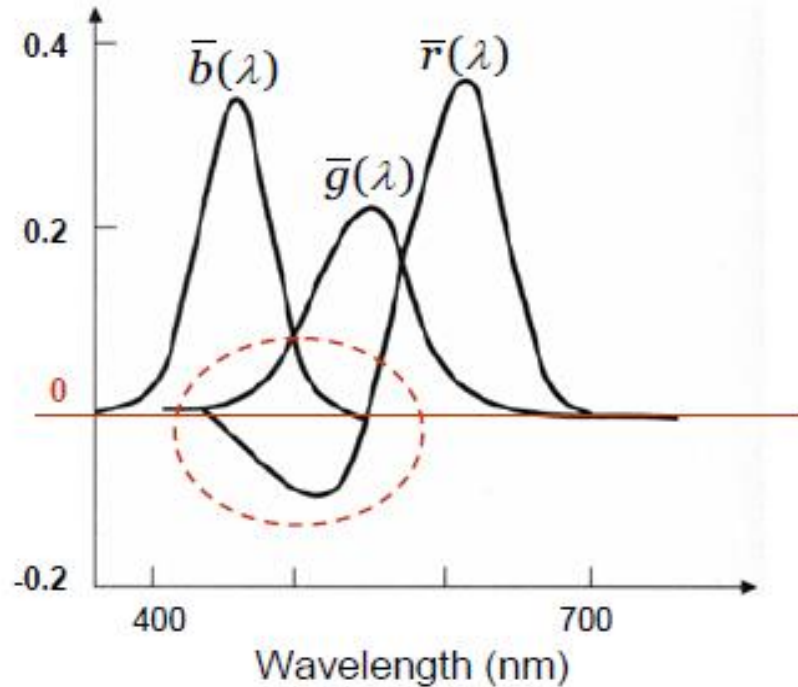
RGB 颜色空间

- 具体来说，颜色表示为三个基本色：**红色 (R)**，**绿色 (G)**，**蓝色 (B)** 的线性组合：
 - $C = rR + gG + bB$
 - 为什么选择红绿蓝作为基本颜色？
 - 以人类视觉的三刺激理论为基础；
 - 人眼的视网膜中有三种锥状视觉神经细胞，分别对红、绿、蓝三种光最敏感

RGB 颜色空间的图示

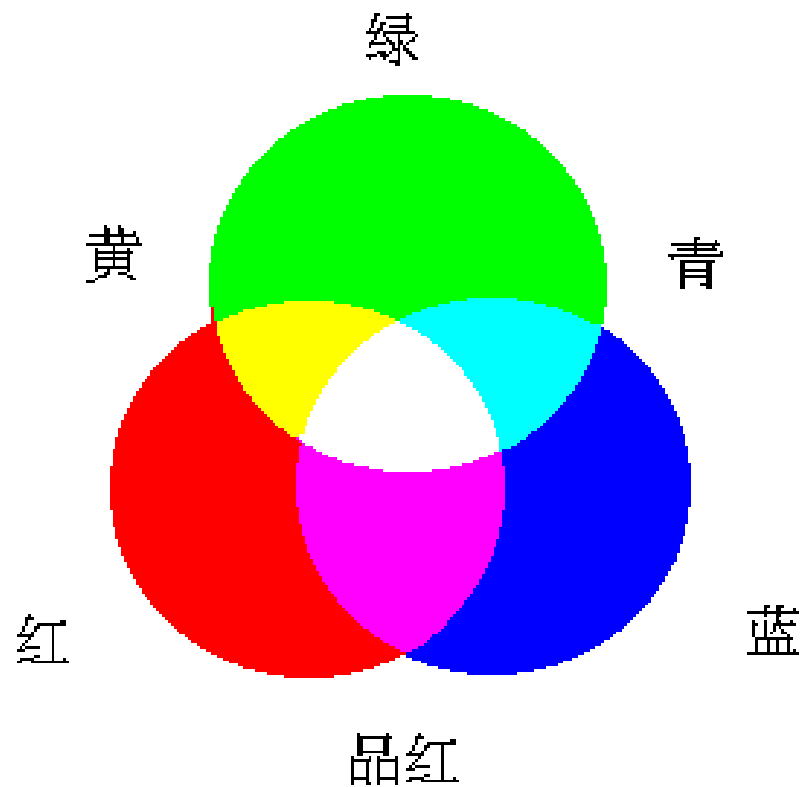


RGB 颜色空间



- 然而，一部分色彩无法表示成 R, G, B 光波的 **正线性组合**，这是 RGB 颜色空间的一个缺点
- 上图为所有可见光对应的 RGB 分量图：

RGB颜色模型



其他颜色空间

- 其他常用的颜色空间还包括：
 - CMY
 - HSV

CMY 颜色空间

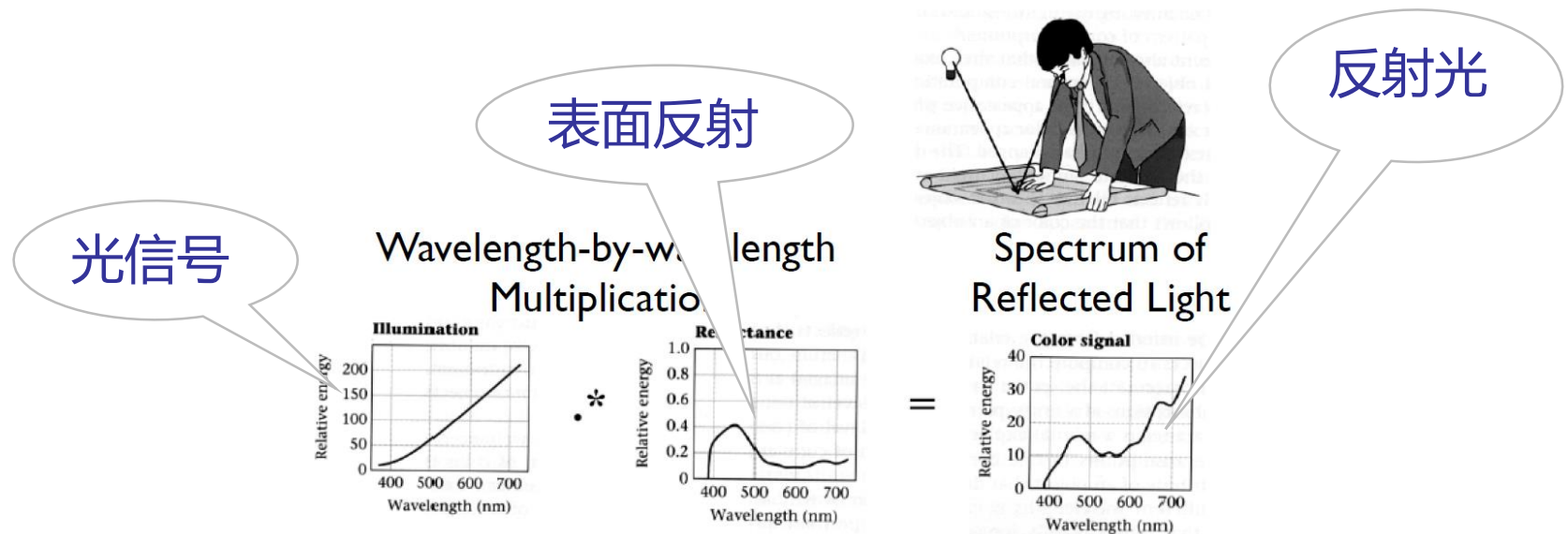
- CMY: 采用不同于 RGB 的另外一组基本颜色:
 - Cyan (青), Magenta (品红), Yellow (黄):
分别是 R, G, B 的补色 (complements)

$$\begin{array}{c} \text{C} \\ \text{M} \\ \text{Y} \end{array} = \begin{array}{c} 1 \\ 1 \\ 1 \end{array} - \begin{array}{c} \text{R} \\ \text{G} \\ \text{B} \end{array}$$

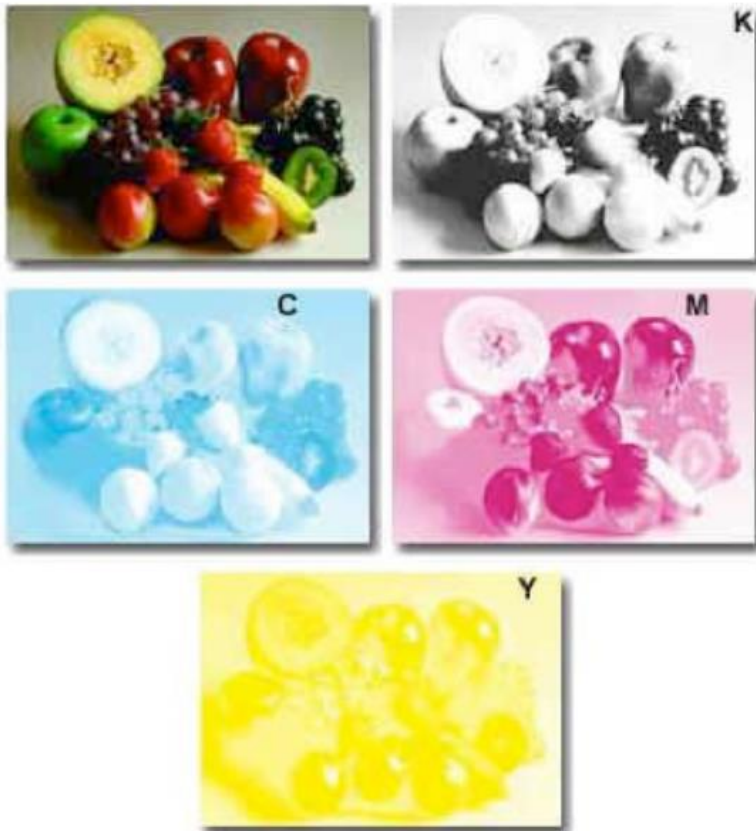
- CMY 被称为 “减色系统” , 而RGB 被称为 “加色系统” :
 - RGB — (0, 0, 0)为黑, (1, 1, 1)为白
 - CMY — (1, 1, 1)为黑, (0, 0, 0)为白,
印刷业只能用CMY模型

RGB (加色) -CMY (减色)

- 加性混合主要应用于主动发光的物体，如液晶显示器、电视机等。
- 减性混合主要应用于被动发光的物体，其颜色由物体表面的反射参数决定。

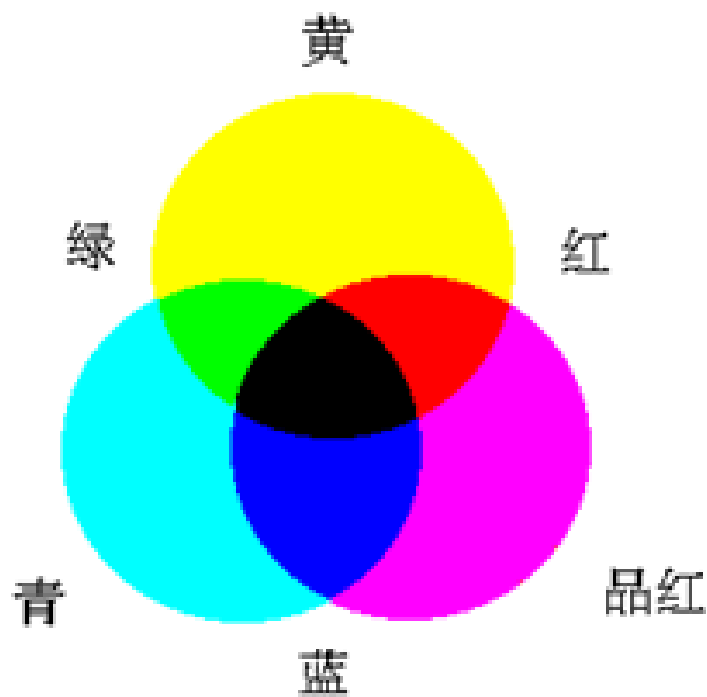


- 打印机的CMYK颜色系统（减性混合）



油墨本身并不能发光，打印出物体的颜色是通过反射光的形式表现出来的。

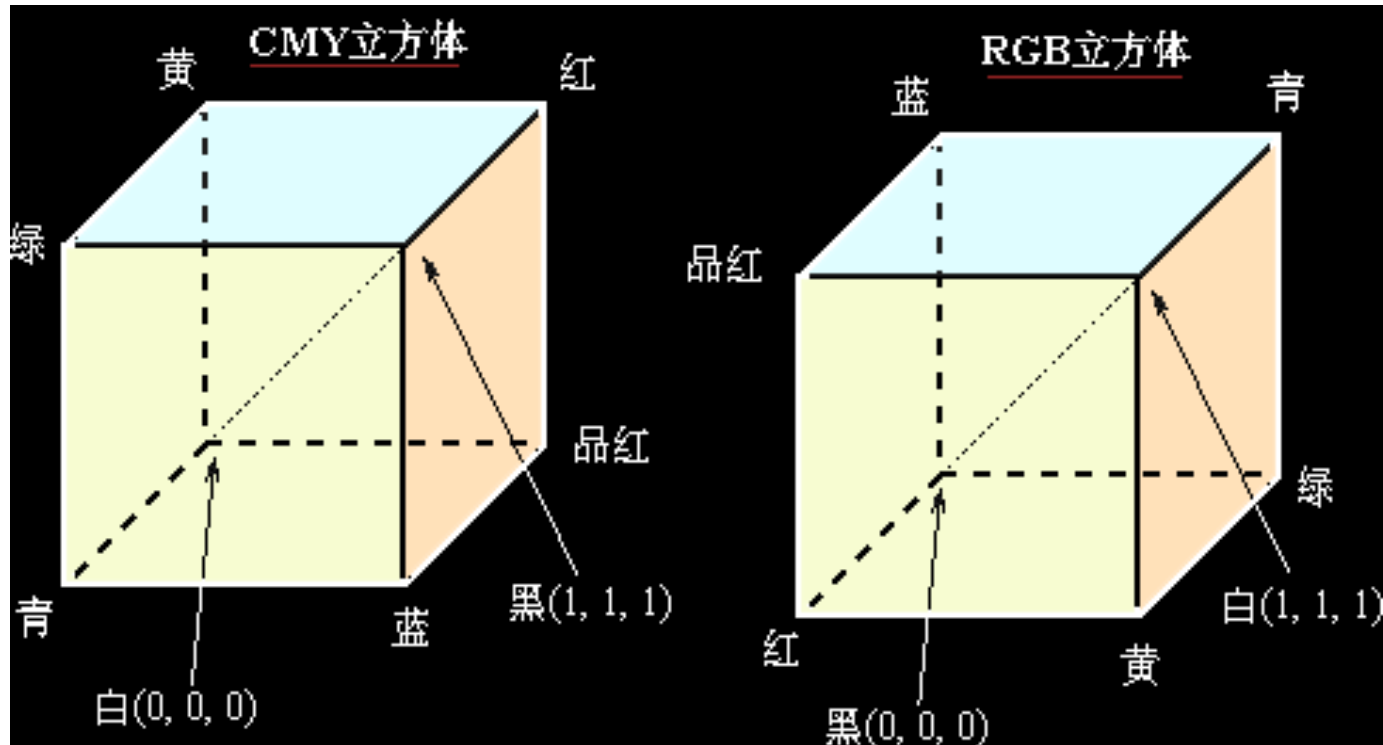
CMYK颜色模型



相加色与相减色的关系

相加混色	相减混色	生成的颜色
RGB	CMY	
000	111	黑
001	110	蓝
010	101	绿
011	100	青
100	011	红
101	010	品红
110	001	黄
111	000	白

颜色模型的空间表示



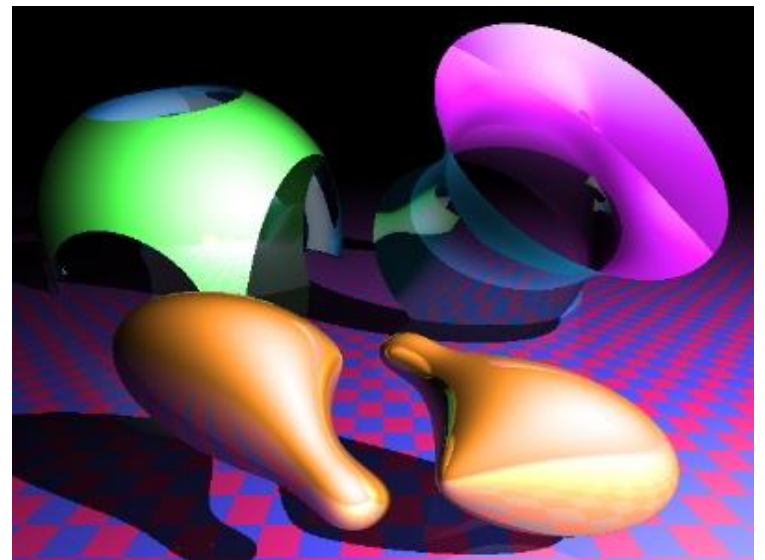
RGB彩色空间和CMY彩色空间的表示法

HSV 颜色空间

- 在8bit的 RGB 颜色空间中，可以包含多达 $256*256*256 = 16,777,216$ 种可能的颜色
- 因此使用 RGB 颜色空间来描述和定位如此大量的颜色非常困难

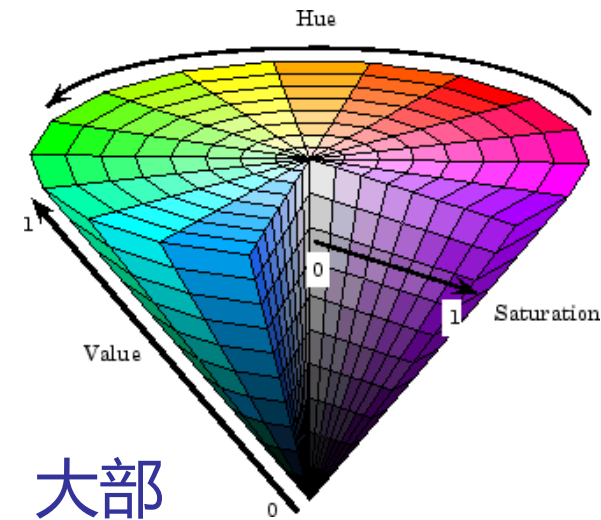
HSV 系统则提供了一个直观的方法来对颜色进行准确的选择

- HSV 颜色空间应用于：艺术领域，以及图像处理、分形图像...



HSV颜色空间

- HSV：圆锥形的颜色空间
 - **Hue (色调)** 也叫色相，它描述了色彩的本征属性，即我们常说的一个色彩是 红、橙、黄、绿、青、蓝、紫，等等
 - **Saturation (饱和度)** 也叫纯度：饱和度越低，色彩越白
 - **Value of brightness (亮度)**：亮度越低，色彩越黑

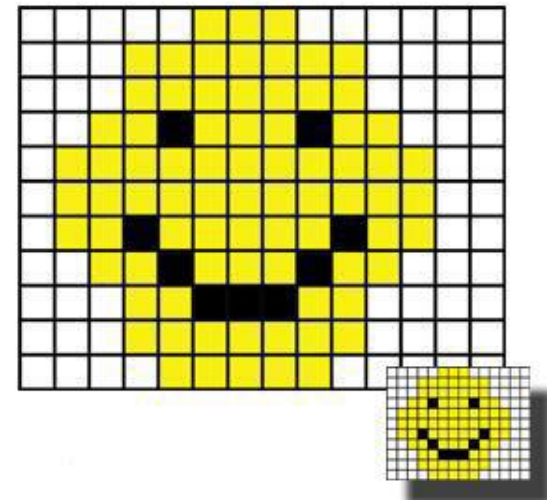


HSV更好地描述了人眼对颜色的感知距离，大部分软件采用基于HSV空间的调色板

图像和像素

● 图像

- 图像可以看成是一个二维离散函数: $f(x, y)$
- 函数 f 的定义域是以矩阵形式排列着的格子, 这些格子被称为 **像素 (pixel)**
- 函数 f 的取值为各个像素的色彩: 对于彩色图像, 可以是 RGB 或者 RGBA (其中A表示透明度); 对于灰度图像, f 为单值函数



三角网格模型

- 图形学的基本目标是什么？
 - 从虚拟的三维场景及特定的相机参数中，生成二维图像
 - 三维场景又以怎样的数据结构来表示？
 - 简单球体、长方体可直接用其几何方程描述；
 - 对于复杂模型，则需要使用**参数曲线和曲面**或者更一般的**网格模型**来进行描述
 - 网格模型之中又以**三角网格**最为常用

三角网格的定义

- 三角网格是由一系列欧氏空间中的三维顶点以及连接这些顶点的若干三角面片组成，具体包括：
 - 顶点集合 $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$
 - 面片集合 $F = (f_1, f_2, \dots, f_m)$
 - 其中 F 中的每个面片 f_i 都是由 V 中的顶点构成的空间三角形：
$$f_1 = (v_{a1}, v_{b1}, v_{c1}), f_2 = (v_{a2}, v_{b2}, v_{c2}), \dots$$

几个例子

- 模型“牛”上显示了三角网格的结构
- 模型“龙”和“人头”是利用三角网格（smooth shading模式）进行绘制的结果
- Shading的概念后面会进行介绍



法向量

- 三角面片的法向量 (normal):
 - 三角面片的法向量是垂直于该三角面片所在平面的非零向量;
 - 对于每个三角面片而言, 其法向量都有两种可能的朝向;
 - 法向量的朝向决定了三角面片的正面与反面;
 - 对于连续可定向的三角网格整体而言, 相邻的三角面片需要具备一致的法向量朝向

法向量

- 三角网格顶点的法向量可以通过其周围所有三角面片的法向量不同方式的加权平均计算：

- 假设 v 是 k 个三角面片 f_1, f_2, \dots, f_k 所共用的顶点；

- 按算数平均计算：

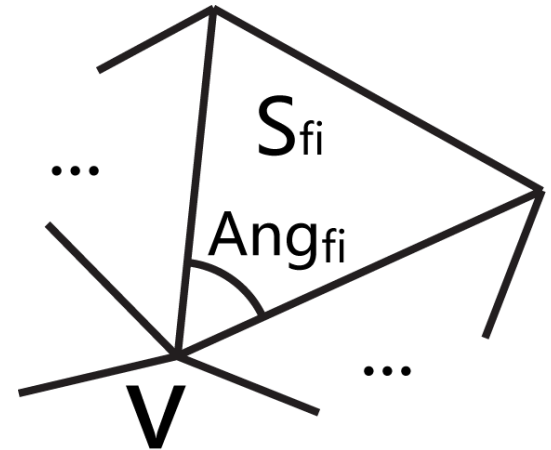
- $N_v = (N_{f1} + \dots + N_{fk}) / k$

- 按面积加权平均计算：

- $N_v = (S_{f1} N_{f1} + \dots + S_{fk} N_{fk}) / (S_{f1} + \dots + S_{fk})$

- 按角度加权平均计算：

- $N_v = (Ang_{f1} N_{f1} + \dots + Ang_{fk} N_{fk}) / (Ang_{f1} + \dots + Ang_{fk})$



三角网格的简单绘制

- 基于颜色的绘制
 - 给三角网格模型的每个顶点指定颜色属性
 - 模型表面每个点的颜色通过其所在三角面片顶点的颜色插值得到
- 基于光照的绘制
 - 给网格模型每个面片指定正反面的材质属性
 - 指定一个虚拟的光照环境
 - 如何计算材质在不同光照条件下呈现出来的颜色就涉及到了**光照模型**的问题

2.2 人眼视觉系统的频率响应

- 空间频率
 - 亮度或色度
- 时间频率
 - 摄像机或目标的运动
- 时间频率与空间频率的联系

空间频率

- 空间频率度量的是图像平面内图像强度变化的快慢
- 空间频率可以用两个正交方向上的频率来表示（例如：水平和竖直方向）
 - f_x ：周期数/水平方向单位距离
 - f_y ：周期数/竖直方向单位距离
- 空间频率也可以用变化幅度和角度来表示

$$f_m = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}, \theta = \arctan(f_y / f_x)$$

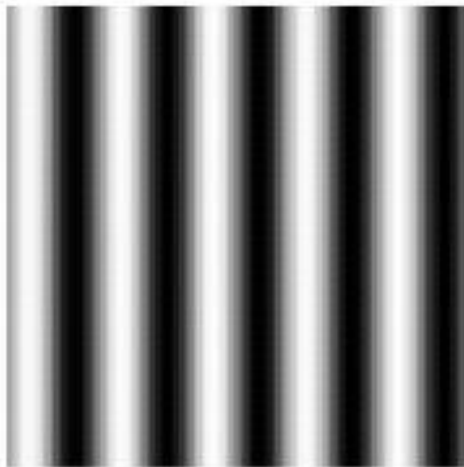
空间频率图解

$$\psi(x, y) = \sin(10\pi x)$$

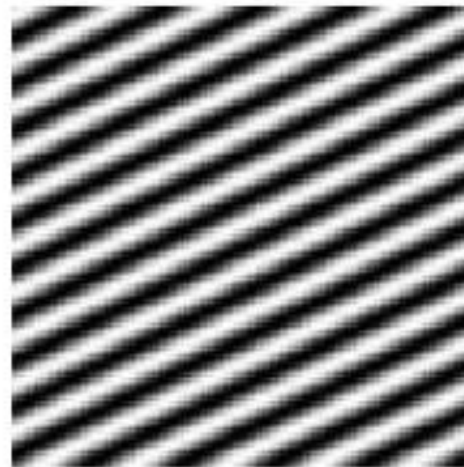
频率: $(f_x, f_y) = (5, 0)$

$$\psi(x, y) = \sin(10\pi x + 20\pi y)$$

频率: $(f_x, f_y) = (5, 10)$



(a)

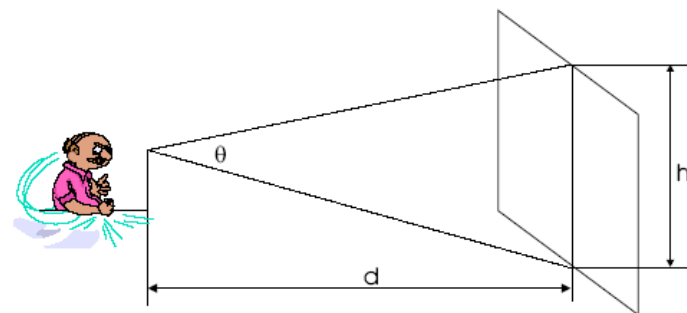


(b)

Two-dimensional sinusoidal signals: (a) $(f_x, f_y) = (5, 0)$; (b) $(f_x, f_y) = (5, 10)$. The horizontal and vertical units are the width and height of the image, respectively. Therefore, $f_x = 5$ means that there are five cycles along each row.

角频率

- 空间频率存在的问题：人眼感知到的变化速度取决于观测的距离。
- 解决办法：角频率的概念被提出。



$$\theta = 2 \arctan\left(\frac{h}{2d}\right) (\text{radian}) \approx \frac{h}{d} (\text{radian}) = \frac{180}{\pi} \frac{h}{d} (\text{degree}).$$

$$f_{\theta} = f_s / \theta = \frac{\pi}{180} \frac{d}{h} f_s \text{ (cycle/degree)}.$$

f_{θ} : 角频率, 每度视角内的变化周期数

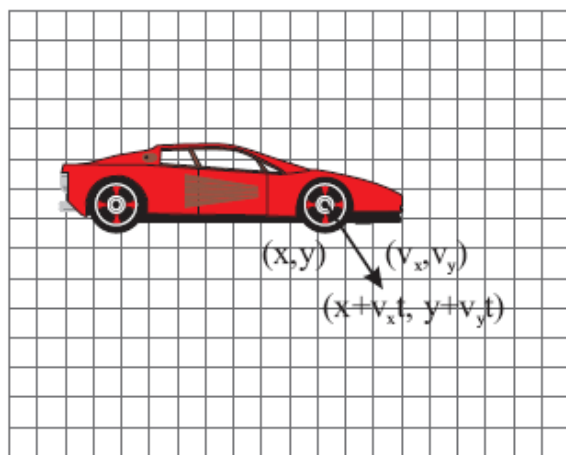
f_s : 每单位图像高度的变化周期数

角频率

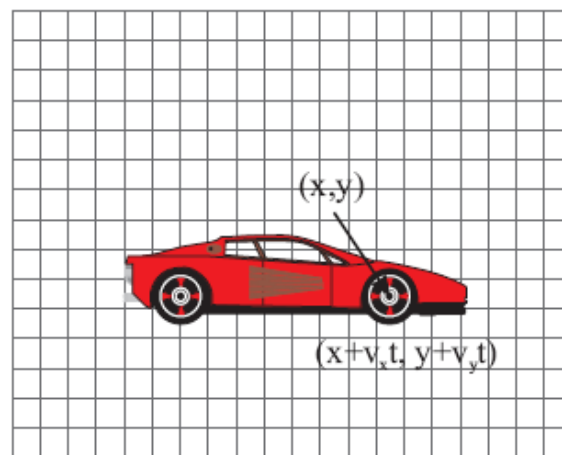
- 两个结论：
 - 对于同一图像，角频率随着观测距离的增加而增加。
 - 在固定的观测距离下，屏幕尺寸越大，角频率越低。
- 人的直觉：
 - 对于同一图像，在更远的距离观测图像变化会更快。
 - 如果在更大的屏幕上观测图像变化会更慢。
- 角频率并不是视频信号本身的特性。它取决于：
 - 视频信号的空间频率
 - 观测条件

时间频率

- 时间频率测量时间的变化（周期数/s）
- 在视频中，时间频率与空间位置有关，因为每个点都可能发生不同的变化。
- 视频的最大时间频率是指成像区域内所有点的时间频率的最大值。
- 时间频率是由摄像机或目标的运动引起的。



$t=0$



$t > 0$

Illustration of the constant intensity assumption under motion. Every point (x, y) at $t = 0$ is shifted by $(v_x t, v_y t)$ to $(x + v_x t, y + v_y t)$ at time t , without change in color/intensity. Alternatively, a point (x, y) at time t corresponds to a point $(x - v_x t, y - v_y t)$ at time 0.

时间频率与空间频率的关系

Consider an object moving with speed (v_x, v_y) . Assume the image pattern at $t = 0$ is $\psi_0(x, y)$, the image pattern at time t is

$$\psi(x, y, t) = \psi_0(x - v_x t, y - v_y t)$$

$$\begin{aligned} \Leftrightarrow \quad \Psi(f_x, f_y, f_t) &= \int \int \int \psi(x, y, t) \exp(-j2\pi(f_x x + f_y y + f_t t)) dx dy dt \\ &= \int \int \psi_0(x - v_x t, y - v_y t) \exp(-j2\pi(f_x(x - v_x t) + f_y(y - v_y t))) dx dy \\ &\quad \cdot \int \exp(-j2\pi(f_t + f_x v_x + f_y v_y)t) dt \\ &= \Psi_0(f_x, f_y) \int \exp(-j2\pi(f_t + f_x v_x + f_y v_y)t) dt \\ &= \Psi_0(f_x, f_y) \delta(f_t + f_x v_x + f_y v_y), \end{aligned}$$

where $\Psi_0(f_x, f_y)$ represents the 2D CSFT of $\psi_0(x, y)$.

The above result shows that $\Psi(f_x, f_y, f_t)$ is non-zero only on the plane defined by

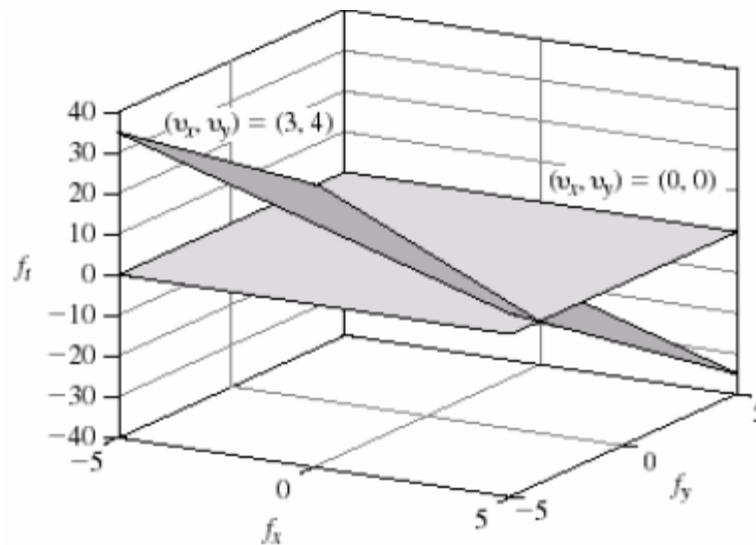
$$f_t + f_x v_x + f_y v_y = 0.$$

时间频率与空间频率的联系

Relation between motion, spatial, and temporal frequency:

$$f_t = -(v_x f_x + v_y f_y)$$

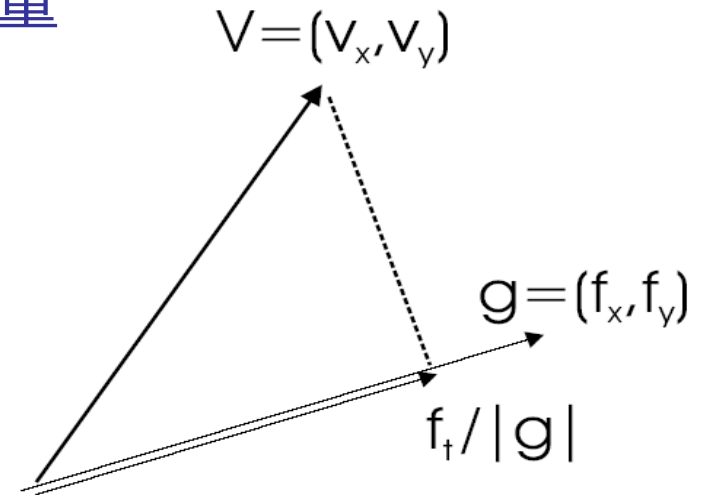
The temporal frequency of the image of a moving object depends on motion as well as the spatial frequency of the object.



- 零频率平面
- 在 (f_x, f_y, f_t) 空间中的非零频率平面, 由两个不同的速度矢量引起
- $f_{t,\max} = 35$

时间频率与空间频率的联系

- 时间频率是速度矢量在空间梯度矢量上的投影。

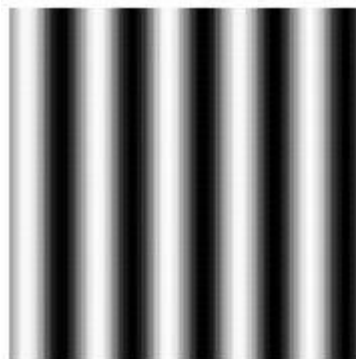


- 结论1:
 - 不论 V 的值为多少, 当 $f_x = f_y = 0$ 时 $f_t = 0$
 - 这意味着如果物体具有完全平坦的图案 (即具有均匀的亮度或颜色), 那么无论物体在图像平面上移动得多快, 都无法观察到任何时间的变化。

时间频率与空间频率的联系

- 结论2:
 - 当运动方向与空间频率方向正交时, 时间频率=0
 - 空间频率方向是亮度变化速度最快的方向; 它的正交方向是没有空间变化的方向。
 - 这一结果表明, 当目标在其图案不变的方向上运动时, 不会产生任何时间的变化。
 - 当目标沿空间变化最大的方向运动时, 时间频率最大。

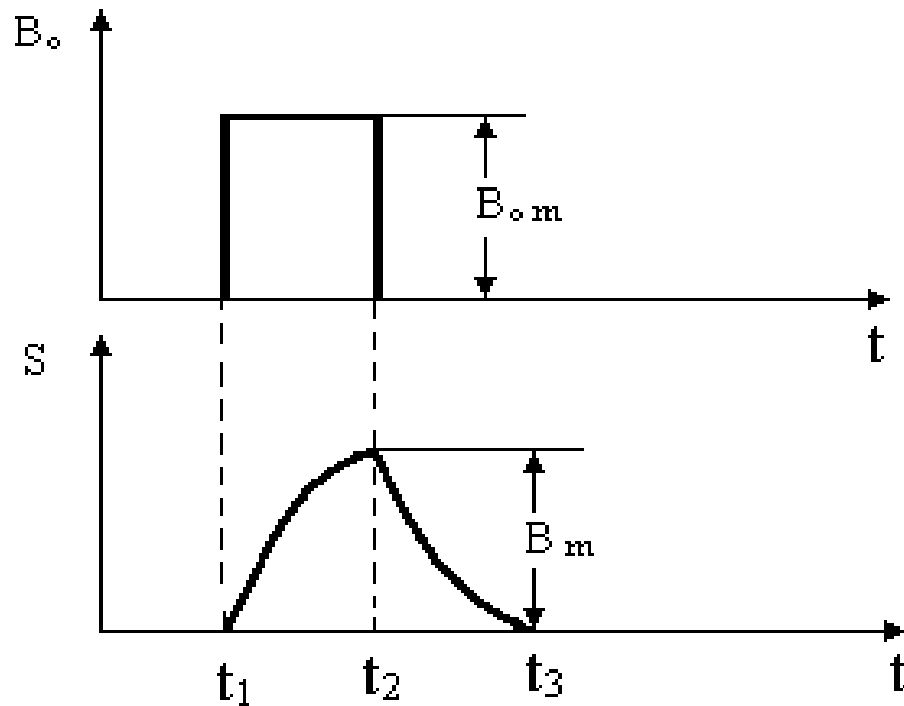
- 示例:
 - 竖直的
 - 略微倾斜的
 - 水平的



人眼视觉系统对频率的响应

- 时间频率响应和闪烁
- 空间频率响应
- 空时响应

视觉的时间域响应特性



- 短暂的光刺激比较长时间的光刺激更加醒目;
- 人的主观感觉滞后于窄光脉冲的刺激;

视觉惰性 (B_o 实际亮度; S 亮度感觉)

视觉的时间域响应特性

- 让观察者观察按时间重复的亮度脉冲，如果闪烁频率比较低，人眼就有一亮一暗的感觉。如果闪烁频率足够高，人眼看到的则是一个恒定的亮点。闪烁感刚好消失的重复频率叫做**临界闪烁频率**，经测定为46Hz。



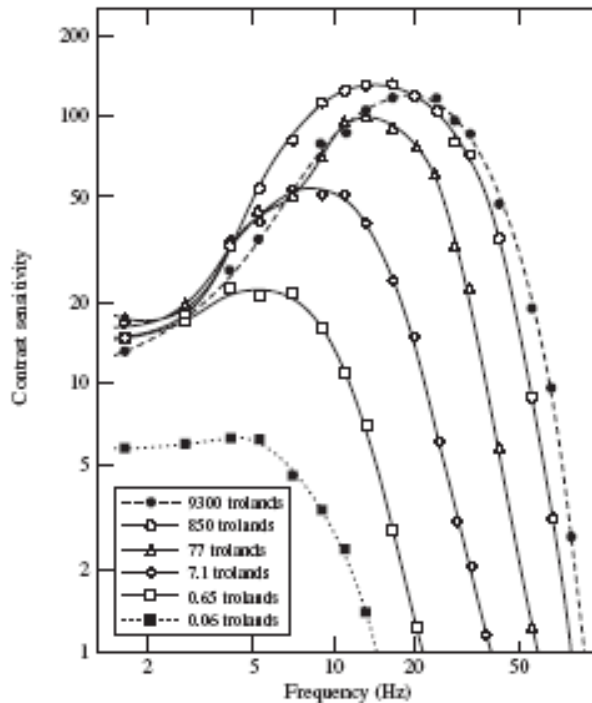
选择画面
闪烁频率

25HZ

50HZ

75HZ

频率响应

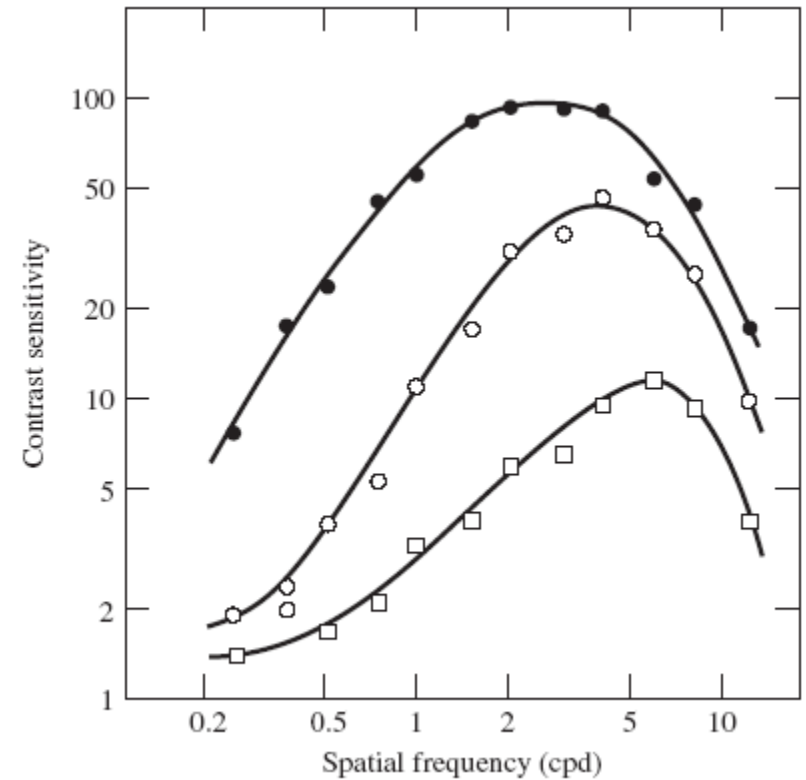


- 临界闪烁频率：人眼感知不到闪烁的最低帧率。
- 为设计视频系统时确定帧率提供了指导。
- 临界闪烁频率取决于显示器的平均亮度：通常60Hz即可满足电视观看的需求。
- 观看电影比电视需要更低的帧率

通过视觉实验得到了人眼视觉系统对时间频率的响应。不同的曲线代表了不同平均亮度 B 下得到的响应，亮度单位为trolands。横轴表示闪烁频率 f ，单位为Hz。

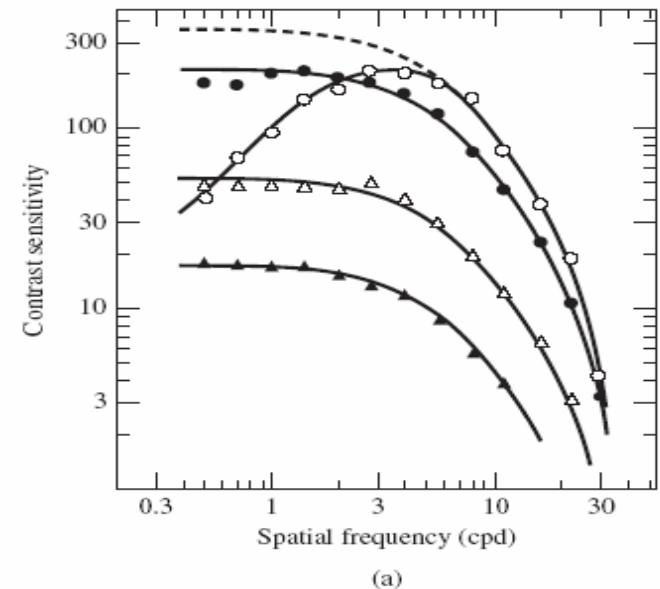
空间响应

- 通过视觉实验得到了人眼视觉系统对空间频率的响应。
- 假设是时间静止的。
- 类似一个带通滤波器。



空时响应

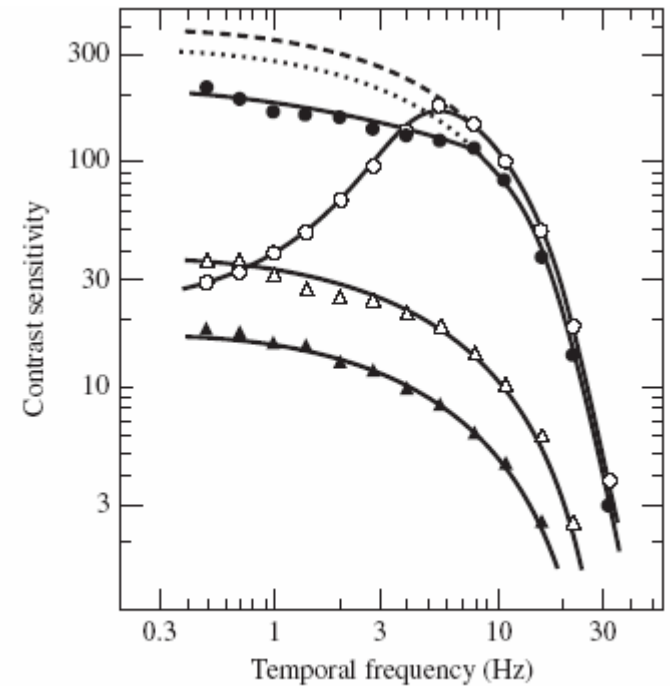
- 在时间频率接近零时，空间频率响应具有带通特性。
- 但是在较高的时间频率下，空间响应更接近于低通响应，且随着时间频率的增加，响应峰值减小。
- 这表明，当图像移动得非常快时，人眼无法区分该图像中非常高的空间频率。
- 当图像静止时，人眼可以分辨出更高的空间频率。



不同时间频率下的空间频率响应：
1 Hz (空心圆)，6 Hz (实心圆)，16 Hz (空心三角形)，22 Hz (实心三角形)。

时空响应

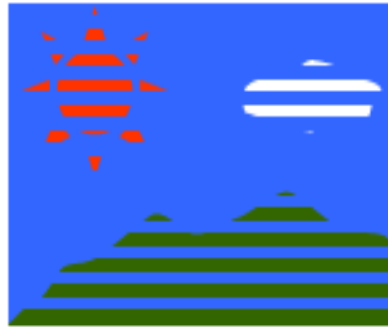
- 在空间频率接近零时，时间频率响应具有带通特性。
- 但是在较高的空间频率下，时间响应更接近于低通响应，且随着空间频率的增加，响应峰值减小。
- 在较高的空间频率下，时间响应变为低通，且临界闪烁频率下降。



(b)

不同空间频率下的时间频率响应：
0.5 cpd (空心圆)，4 cpd (实心圆)，
16 cpd (空心三角形)，22 cpd (实心三角形)。

电视机显示隔行扫描示意图



奇数场图像



偶数场图像



一帧图像

隔行扫描示意图

空时响应

- 在电视系统设计中利用了空间灵敏度和时间灵敏度的相反关系。
- 隔行扫描提供了空间和时间分辨率之间的折中。
 - 在隔行扫描中，为了在有限的帧率下渲染快速变化的场景，每一帧被分割成两场，每场中的行数为该帧的一半。在快速变化的场景中，眼睛将无法区分非常高的空间频率。
 - 当成像场景静止时，两个独立场中的各行结合起来提供高空间分辨率，以适应HVS较高的空间频率分辨能力。
- 为什么在近距离看电视时，会感觉到行闪烁？
 - 距离越近- \rightarrow 角频率越低- \rightarrow 临界闪烁频率增加

2.3 图形设备

- 图形显示设备

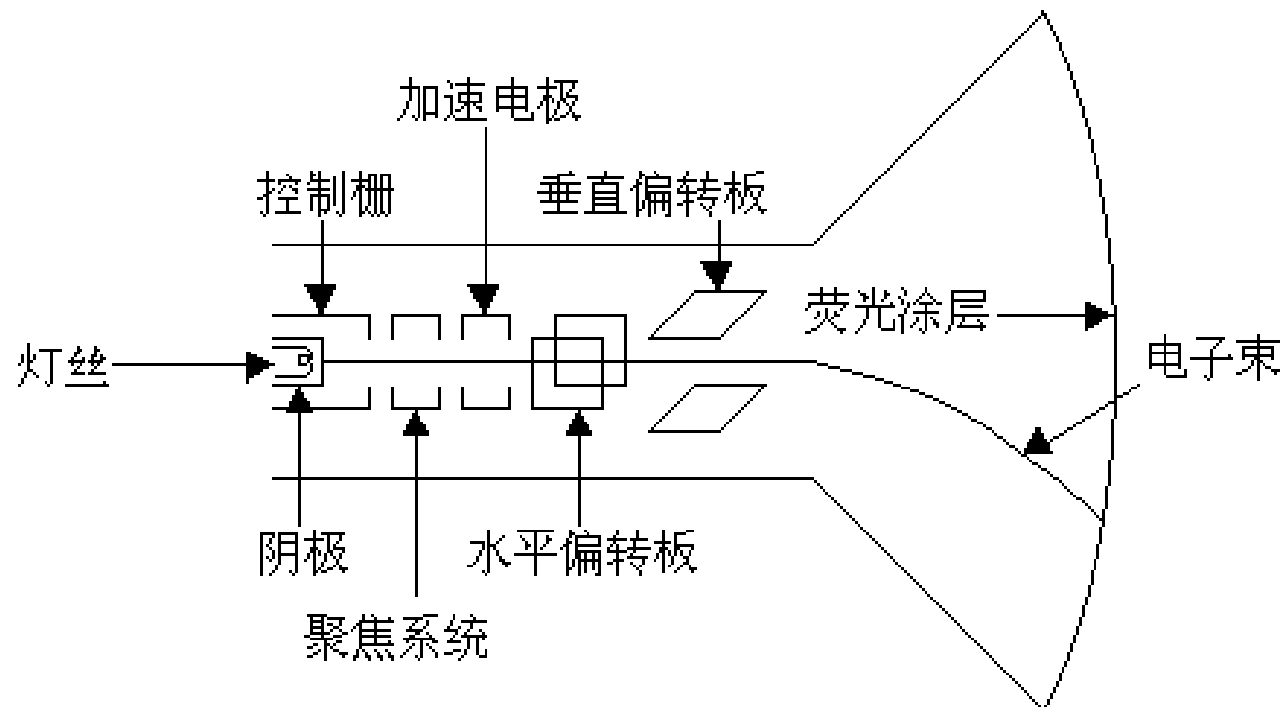
- 图形输出包括图形的显示和图形的绘制，**图形显示**指的是在屏幕上输出图形
- **图形绘制**通常指把图形画在纸上，也称硬拷贝，打印机和绘图仪是两种最常用的硬拷贝设备

图形显示器

- 阴极射线管
- 彩色阴极射线管
 - 射线穿透法
 - 影孔板法
- 随机扫描显示系统
- 光栅扫描系统

阴极射线管 (CRT)

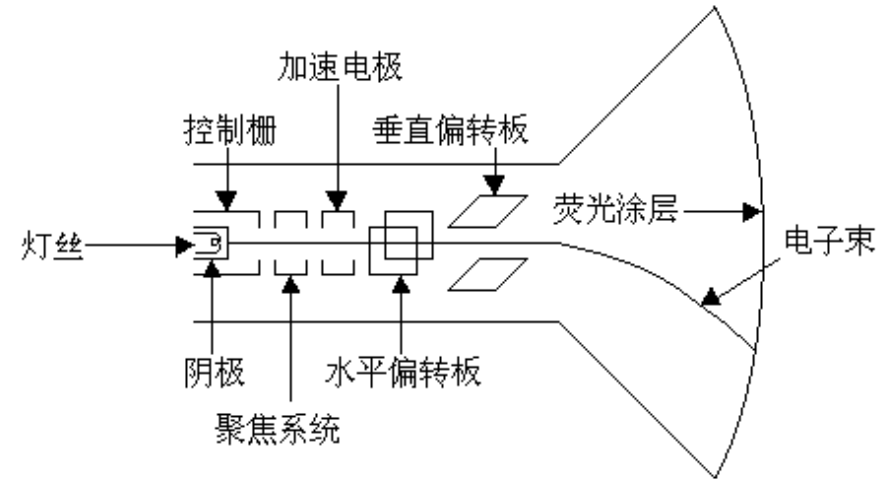
- 阴极射线管(CRT- Cathode Ray Tube)
 - 组成：包括电子枪、加速结构、聚焦系统、偏转系统、荧光屏



阴极射线管(CRT)

— 工作原理

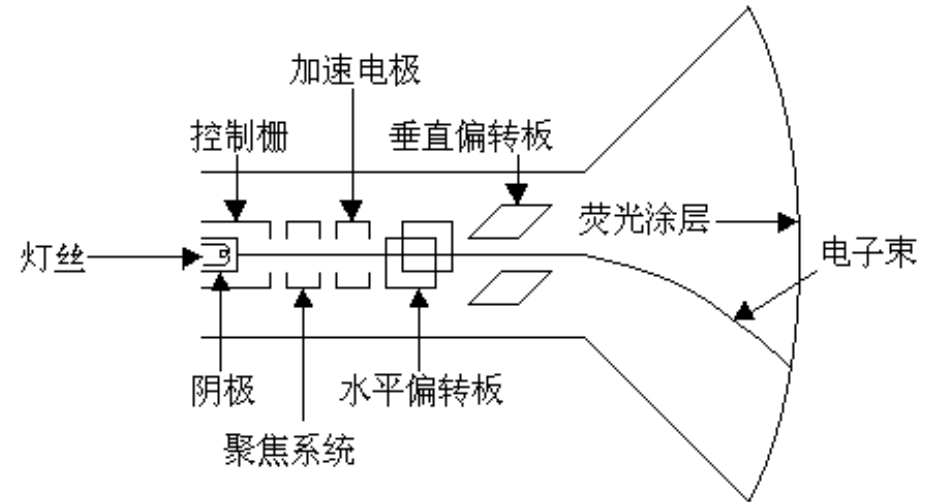
- 高速的电子束由**电子枪**发出，经过**聚焦系统**、**加速系统**和**磁偏转系统**就会到达荧光屏的特定位置。
- 由于荧光物质在高速电子的轰击下会发生电子跃迁，即电子吸收到能量从低能态变为高能态。



由于高能态很不稳定，在很短的时间内荧光物质的电子会从高能态重新回到低能态，这时将发出荧光，屏幕上的那一点就会亮了

- 要保持显示一幅稳定的画面，必须不断地发射电子束
- 刷新频率
 - **刷新**一次是指电子束从上到下扫描一次的过程
 - 刷新频率高到一定值后，图象才能稳定显示

电子枪



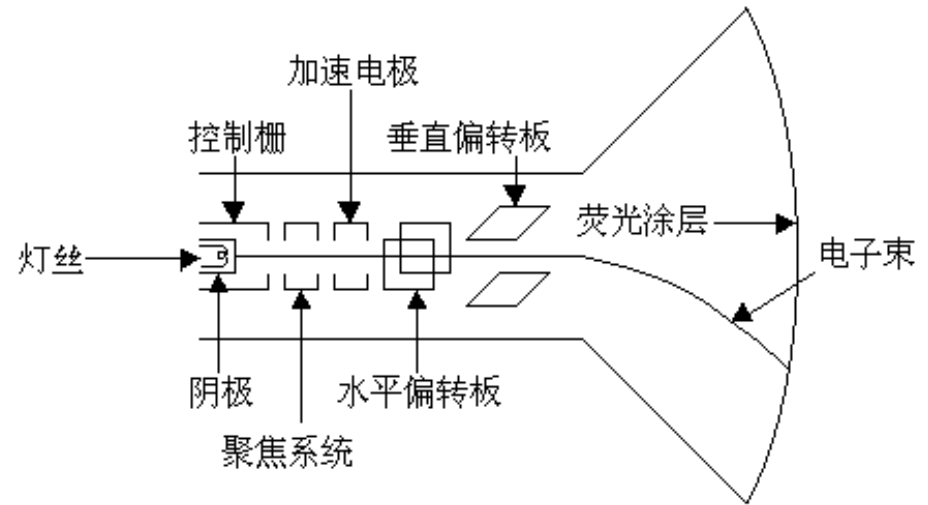
- 电灯丝，阴极和控制栅组成。
- 阴极：由灯丝加热发出电子束，
- 控制栅：加上负电压后，能够控制通过其中小孔的带负电的电子束的强弱。通过调节负电压高低来控制电子数量，即控制荧光屏上相应点的亮度。

聚焦系统

保证电子束在轰击屏幕时，汇聚成很细的点。

加速电极

加正的高压电（几万伏），使电子束高速运动。



偏转系统

- 控制电子束，静电场或磁场，产生偏转。
- 电子束要到达屏幕的边缘时，偏转角度就会增大。到达屏幕最边缘的偏转角度被称为最大偏转角
- 最大偏转角是衡量系统性能的最重要的指标，显示器长短与此有关
- CRT显示器屏幕越大整个显象管就越长

荧光屏

- 荧光物质：当它被电子轰击时发出亮光
- 持续发光时间：电子束离开某点后，该点的亮度值衰减到初始值1/10所需的时间
- 刷新频率：每秒钟重绘屏幕的次数

某种CRT产生稳定图像所需要的最小刷新频率
=1秒/荧光物质的持续发光时间

例如：一种荧光物质持续光时间40毫秒，刷新频率为 $1000/40=25$ 帧/秒，发光时间短，适用于动态图形显示。发光时间长，适用于静态图形显示

荧光屏

- 像素(Pixel:Picture Cell): 构成屏幕 (图像) 的最小元素
- 分辨率(Resolution): CRT在水平或竖直方向单位长度上能识别的最大像素个数, 单位通常为dpi (dots per inch).
 - 在假定屏幕尺寸一定的情况下, 也可用整个屏幕所能容纳的像素个数描述, 如640*480, 800*600, 1024*768, 1280*1024等等

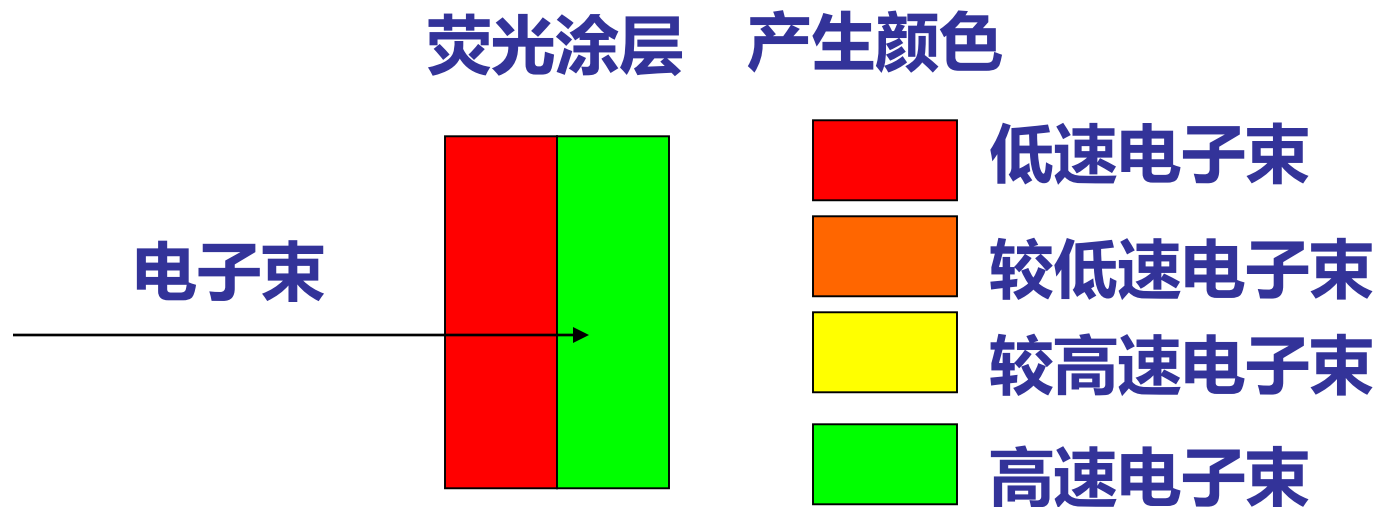
彩色阴极射线管

产生彩色的常用方法：

- 射线穿透法
- 影孔板法

彩色阴极射线管-射线穿透法

- 原理：两层荧光涂层，红色光和绿色光两种发光物质，电子束轰击穿透荧光层的深浅，决定所产生的颜色



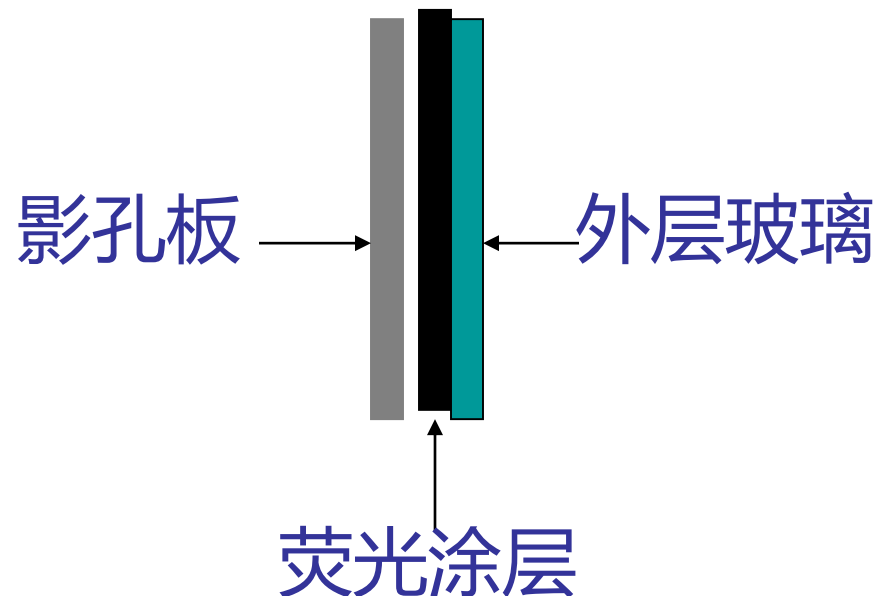
彩色阴极射线管-射线穿透法

- 应用：主要用于画线显示器
- 优点：成本低
- 缺点：只能产生有限几种颜色
图形质量比较差

彩色阴极射线管-影孔板法

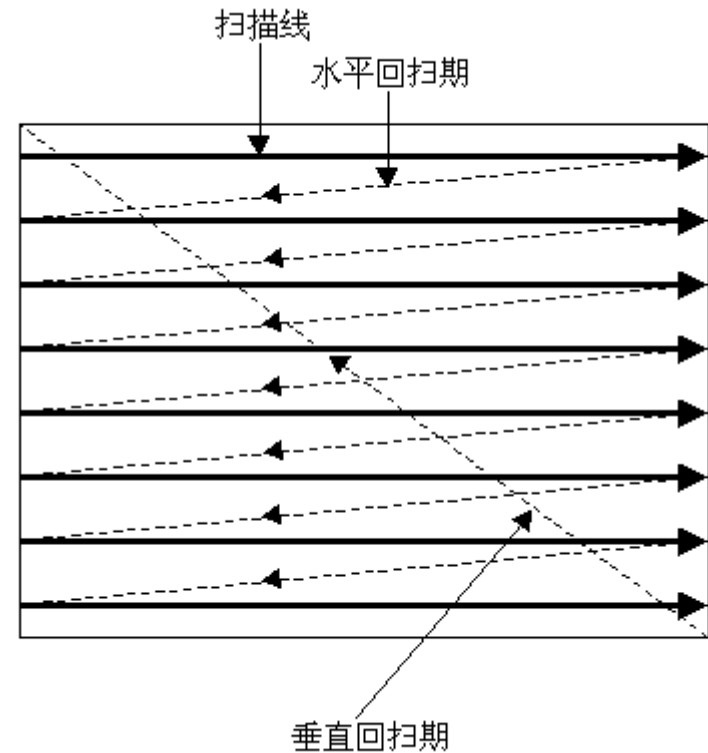
● 影孔板法

- 原理：通常用于光栅扫描显示器中，颜色范围广，每个像素有三个荧光点（红、绿、蓝三基色）。影孔板被安装在荧光屏的内表面，用于精确定位像素的位置

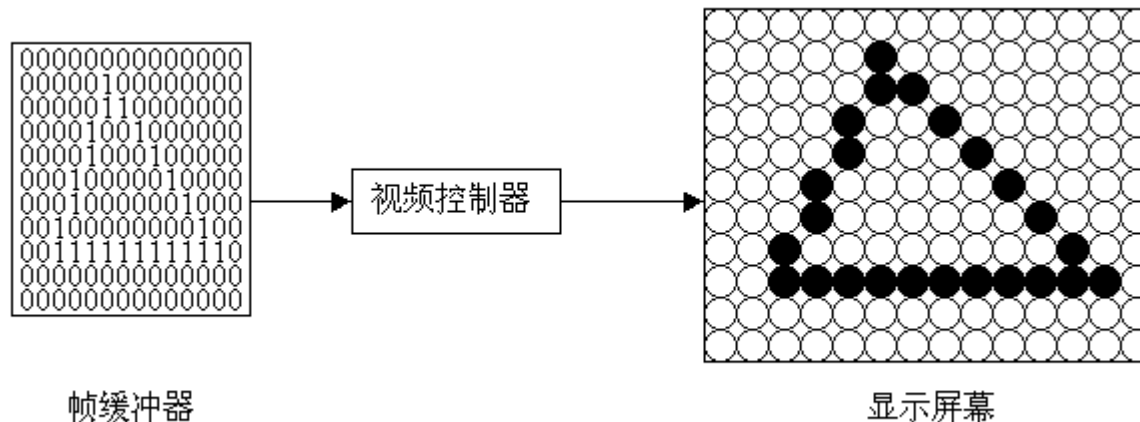


光栅扫描的显示系统

- 光栅扫描显示系统
 - 特点：光栅扫描
 - 扫描线
 - 帧
 - 水平回扫期
 - 垂直回扫期

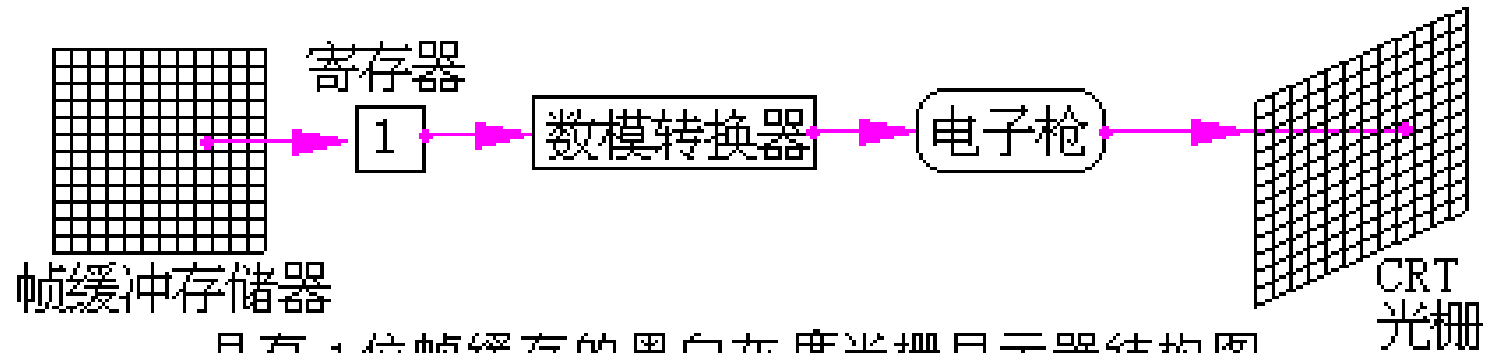


- 逻辑部件：帧缓冲存储器 (Frame Buffer), 视频控制器 (Video Controller), 显示处理器 (Display Processor), CRT
- 帧缓冲存储器
 - 作用：存储屏幕上像素的颜色值
 - 简称帧缓冲器，俗称显存



- 像素所呈现的颜色或灰度由数值表示，视频控制器刷新时，需反复读这些数值。
- 用来存储像素颜色（灰度）值的存储器就称为帧缓冲存储器。简称帧缓冲器（显存）。
- 帧缓存中单元数目与显示器上像素的数目相同，单元与像素一一对应，各单元的数值决定了其对应像素的颜色。
- 显示颜色的种类与帧缓存中每个单元的位数有关（图示帧缓冲器的每个单元只有一位）。

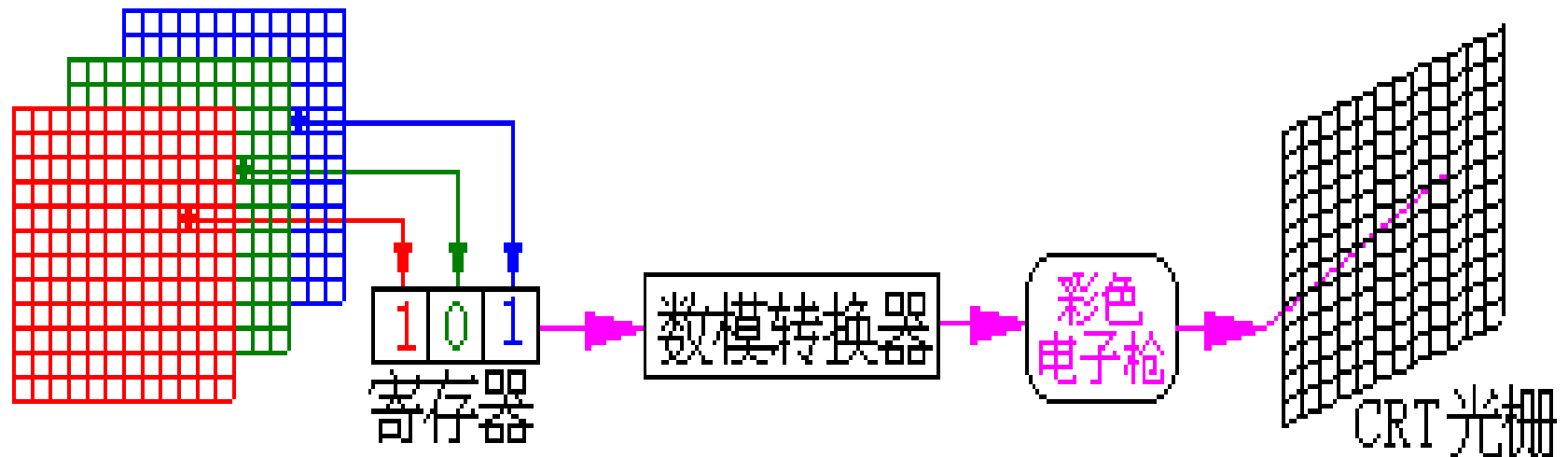
黑白光栅扫描显示器



- 黑白光栅显示器的逻辑框图如上：其中帧缓存是一块连续的计算机存储器。
- 对于黑白单灰度显示器每一像素需要一位存储器，对一个 1024×1024 像素组成的黑白单灰度显示器所需要的最小缓存为 2^{20} ，并在一个位面上。
- 一个位面的缓存只能存储黑白图形，帧缓存是数字设备，光栅显示器是模拟设备，因而还需要数模转换器(DAC)。

彩色光栅扫描显示器

- 下图是彩色光栅显示器的逻辑图，对于红、绿、蓝三原色有三个位面的帧缓存和三个电子枪。



一个简单的彩色帧缓冲存储器

彩色光栅扫描显示器

- 若每个单元有24位（每种基色占8位）即显示系统可同时产生 2^{24} 种颜色（24位真彩色）。
- 分辨率 $M \times N$ 、颜色个数 K 与显存大小 V 的关系

$$V \geq M \times N \times \lceil \log_2 K \rceil$$

彩色光栅扫描显示器

- 3个位面分辨率是 1024×1024 的显示器，需要 $3 \times 1024 \times 1024$ (3145728) 位的存储器。
- 若存储器位长固定，则屏幕分辨率与同时可用的颜色种数成反比关系。
- 1兆字节的帧缓存，
 - 若设分辨率为 640×480 ，则帧缓存每个单元可有24位，可能同时显示 2^{24} 种颜色，
 - 若设分辨率为 1024×768 ，则每个单元分得的位数仅略多于8，只能工作于256色显示模式下。

彩色光栅扫描显示器

- 带宽T与分辨率、帧频F的关系

$$T \geq M \times N \times F$$

带宽问题

- 高分辨率和高刷新频率要求有高带宽
- 依然是个问题!
- 解决方法: 隔行扫描: 把一帧分两场, 即奇数场与偶数场
- 场频: $= 2 \times \text{帧频}$

隔行扫描工作原理

- 一帧完整的画面分成两场。
- 一场 $1 / 60$ 秒，（场频 60 Hz），（帧频 30 Hz）画面更新频率仍为 60 Hz，降低了闪烁效应，每一场 $1 / 60$ 秒内，帧缓存中数据量比逐行扫描少一半。
- 降低了视频控制器存取帧缓存的速度及传输带宽的要求。

显示处理器

- 低档图形显示系统，扫描转换工作直接由CPU类完成。
- 任务：扫描转换待显示的图形。
- 简单的：直线、圆弧、多边形等，
- 复杂的：光栅操作（像素块的移动、拷贝），几何变换、裁剪、消隐， ...

几个概念

● 行频、帧频

- 行频又称水平扫描频率，是电子枪每秒在屏幕上扫描过的水平线条数。
- 帧频又称垂直扫描频率，是每秒钟屏幕重复绘制显示画面的次数，即重绘率。

● 色彩与亮度等级

- 亮度等级又称灰度，主要指单色显示器的亮度变化。
- 色彩包括可选择显示器颜色的数目以及一帧画面可同时显示的颜色数，与荧光屏的质量有关，并受显示存储器容量的影响。

几个概念

● 带宽

- 表示显示器显示能力的一个综合指标。**带宽**指每秒钟扫描的像素个数；即单位时间内每条扫描线上显示的像素数总和。
- **带宽**越大表明显示器显示控制能力越强，显示效果越佳。现在的显示器**带宽**基本都能能达到80MHz，若能达到100MHz或110MHz以上则更好。

● 显示速度

- 指显示字符、图形特别是动态图像的速度，与显示器的分辨率及扫描频率有关。
- 可用最大带宽（水平像素数 × 垂直像素数 × 最大帧频）来表示。

LCD显示器

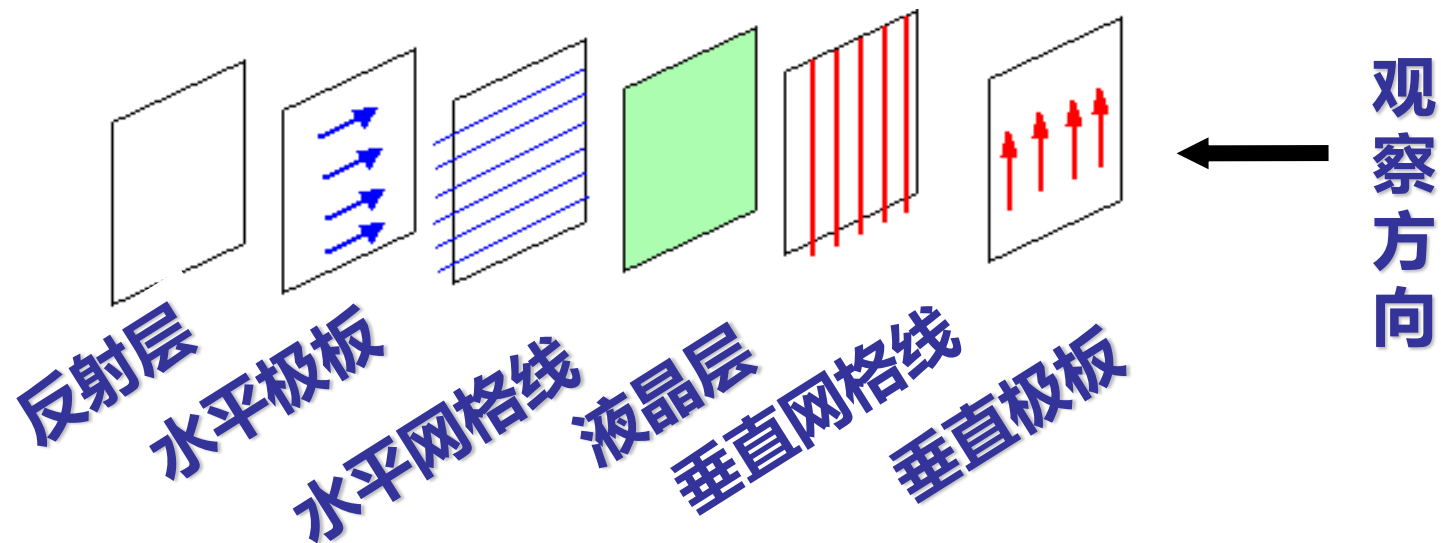
- CRT固有的物理结构限制了它向更广的显示领域发展
 - 屏幕的加大必然导致显象管的加长，显示器的体积必然要加大，在使用时候就会受到空间的限制
 - CRT显示器是利用电子枪发射电子束来产生图像，容易受电磁波干扰
 - 长期电磁辐射会对人们健康产生不良影响

● LCD显示器的优点

- 外观小巧精致，厚度只有6.5~8cm左右。
- 不会产生CRT那样的因为刷新频率低而出现的闪烁现象
- 工作电压低，功耗小，节约能源
- 没有电磁辐射，对人体健康没有任何影响

LCD显示器的构成

- 液晶显示器LCD(Liquid Crystal Display)是由六层薄板组成的平板式显示器



LCD显示器基本原理

- 液晶是一种介于液体和固体之间的特殊物质，它具有液体的流态性质和固体的光学性质。
- 当液晶受到电压的影响时，就会改变它的物理性质而发生形变，此时通过它的光的折射角度就会发生变化，而产生色彩

LCD显示器的基本指标

● 可视角度

- 视线与屏幕中心法向成一定角度时，人们就不能清晰地看到屏幕图象，而那个能看到清晰图象的最大角度被我们称为可视角度。
- 一般所说的可视角度是指左右两边的最大角度相加。工业上有CR10 (Contrast Ratio)、CR5两种标准来判断液晶显示器的可视角度

LCD显示器的基本指标

● 点距与分辨率

- 液晶屏幕的点距就是两个液晶颗粒（光点）之间的距离，一般0.28~0.32mm就能得到较好的显示效果
- 通常所说的液晶显示器的分辨率是指其真实分辨率，表示水平方向的像素点数与垂直方向的像素点数的乘积

液晶显示器的缺点



- 寿命短、怕震动、温度敏感
- 分辨率相对较低，色彩不够鲜艳，且价格偏高。

未来显示器

1. 超高分辨率：向着8K及以上分辨率发展，提供极致的细节和清晰度。
2. 高刷新率：刷新率可能会常规化达到240Hz以上，使动态画面更加流畅。
3. 广色域与深色域：覆盖更广泛的色彩空间，如Adobe RGB、DCI-P3，以及更深的黑色层次，提升画面质量。
4. 柔性与可折叠：采用柔性材料，实现可折叠或卷曲，便于携带且能创造新的使用场景。
5. 透明显示：透明显示技术让显示器在展示图像的同时，背景物体也能透视显示，适用于未来家居、广告等多种场景。
6. 环保节能：使用更环保的材料和技术，降低能耗，减少对环境的影响。