

第2章 数字图像基础

§ 2.1 视觉感知要素

§ 2.2 光和电磁波谱

§ 2.3 图像感知和获取

§ 2.4 图像取样和量化

§ 2.5 像素间的基本关系

§ 2.6 线性和非线性操作(略)



第2章 数字图像基础

§ 2.1 视觉感知要素

- 视觉感知要素介绍有关视觉的基本概念和基本定义。

- 视觉感知主要研究：

 - 光的物理特性(光波、光谱)；

 - 光刺激视觉感受器官的程度(视觉适应、光度学、色度学)；

 - 光作用于视网膜后产生的亮度和颜色的感觉；

人类视觉是人眼对场景**可见光能量**在视网膜上形成的一种刺激，通过人脑对刺激信号的处理，获取场景的描述和感知。

通过长期进化，眼睛和视神经系统组成人类视觉的功能已经非常完善，尽管视觉机理还不十分清楚，但它所表现出的特征和能力，给数字图像处理和计算机视觉研究提供了良好的启示和无限的研究课题。

人类视觉也具有一些弱点：

因为人类进化过程中，总是把重点放在与生存活动密切相关的方面，视觉功能也不例外。另外，场景图像的复杂性有时也会使人类视觉无能为力。

1. 人只能感觉可见光波段能量，对其它波段不敏感；
 2. 人眼视场角固定，空间分辨率和灰度分辨率有限；
 3. 人眼有积分效应，对单次图像瞬间变化、快速运动图像的分析 and 存储困难；
 4. 准确测量图像参数能力较差；
 5. 受知识水平差异的影响，人对同一图像的响应不同；
 6. 人是有思想的生物体，视觉受情绪和疲劳程度的影响。
- 因此必须了解人的视觉系统、研究视觉模型；
- 讲课思路：视觉感知要素->视觉模型->图像取样量化

§ 2.1 视觉感知要素

§ 2.1.1 人眼的构造

图像是可见光刺激人的视网膜引起的视觉感受；即视觉与人眼密切相关，研究视觉必须对人眼生理结构有所了解。

人眼结构：视网膜表面分布着许多光接受细胞(胶片)；

光接受细胞具体分为两类：

锥细胞、柱细胞；（参考以下的眼球结构图）

眼球结构

平均直径：20mm

虹膜：控制入光量
2mm~8mm，

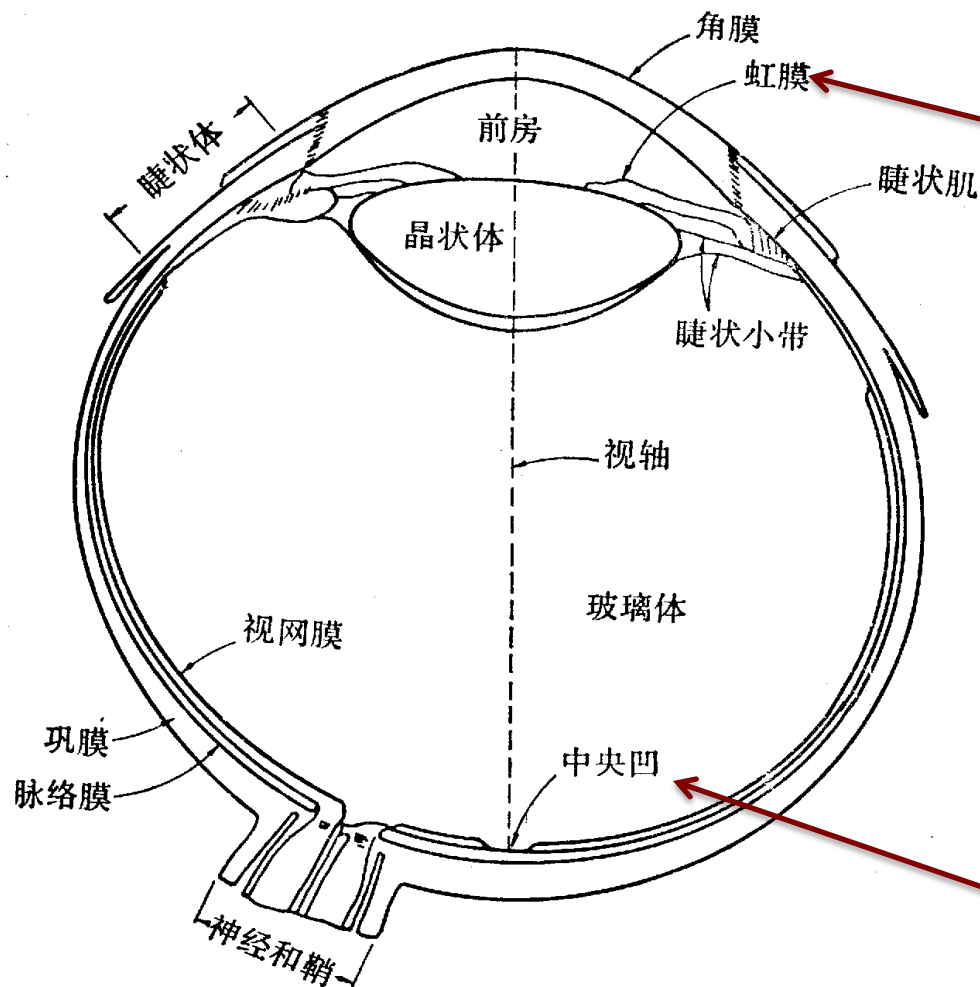
视网膜：图像视觉
锥细胞：亮度视觉
颜色和细节识别

600万~700万

柱细胞：暗视觉
7500万~14000万

夜视和微光视觉

中央凹：传感矩阵



(1) 锥细胞：约700万个，对细节和颜色很敏感；

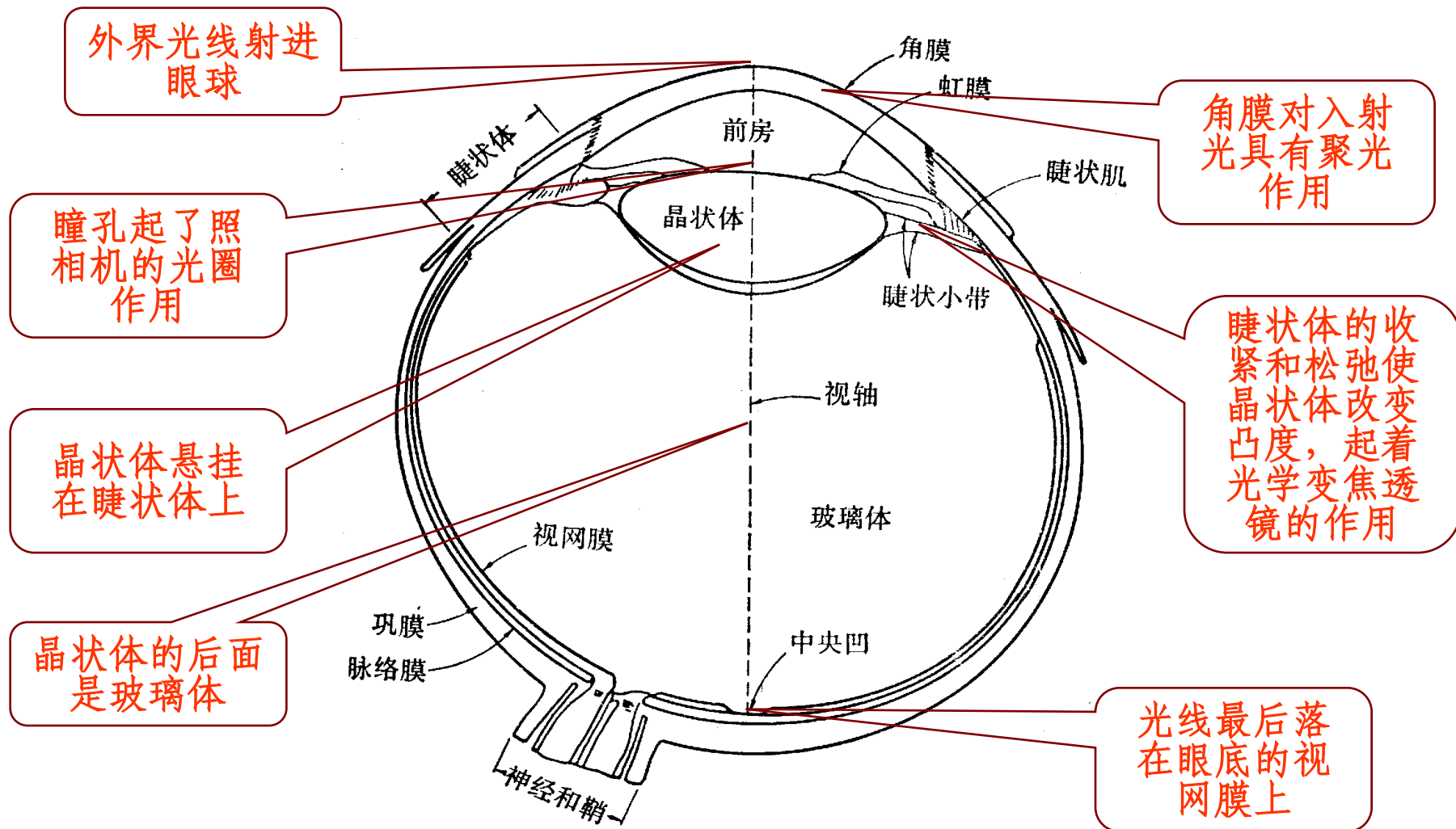
锥细胞视觉称为明视觉或亮光视觉；

(2) 柱细胞：约1亿4000万个，分辨率比较低，对低照度较敏感，它们不感受颜色，主要提供视野的整体视像；

柱细胞视觉称为暗视觉或微光视觉；

(3) 视网膜中心可看作 $1.5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$ 的方形传感器矩阵 (机器人用传感器模拟人眼)；

§ 2.1.2 眼睛中图像的形成





HUAZHONG UNIVERSITY OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Wuhan, 430074, P.R. China

華中科技大學

中華人民共和國 湖北 武漢



§ 2.1.3 视觉现象

一、同时对比度

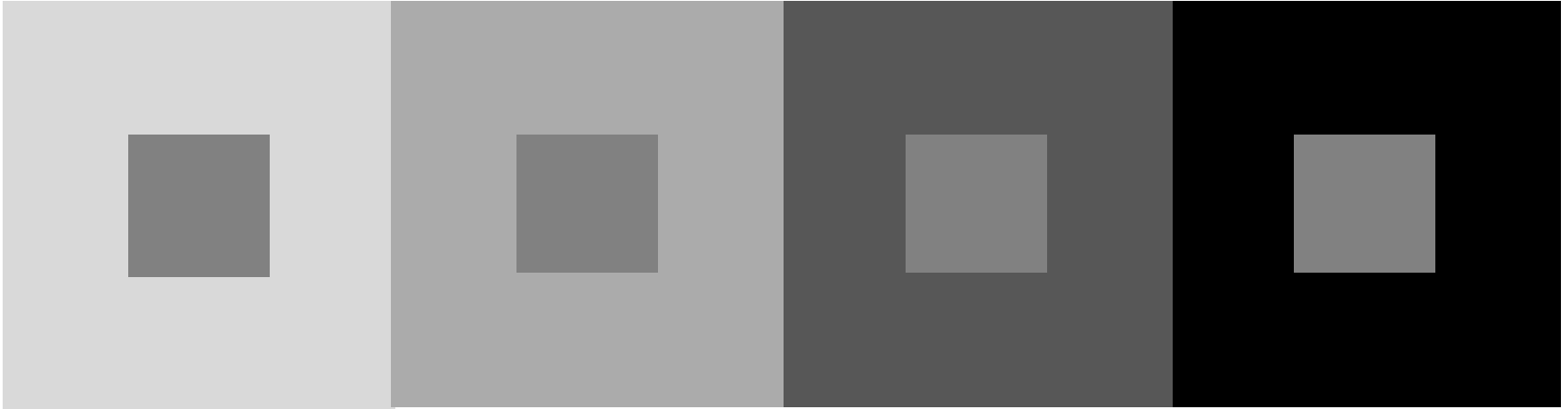
在相同亮度的刺激下,由于背景亮度不同,人眼所感受到的主观亮度不同,这种效应称为**同时对比度**。

同时对比度分为:

亮度对比: 由亮度差别引起的, 故称为亮度对比;

色度对比: 由背景颜色不同引起的;

亮度对比:



背景亮度：从明亮到黑暗

目标小方块：灰度相同

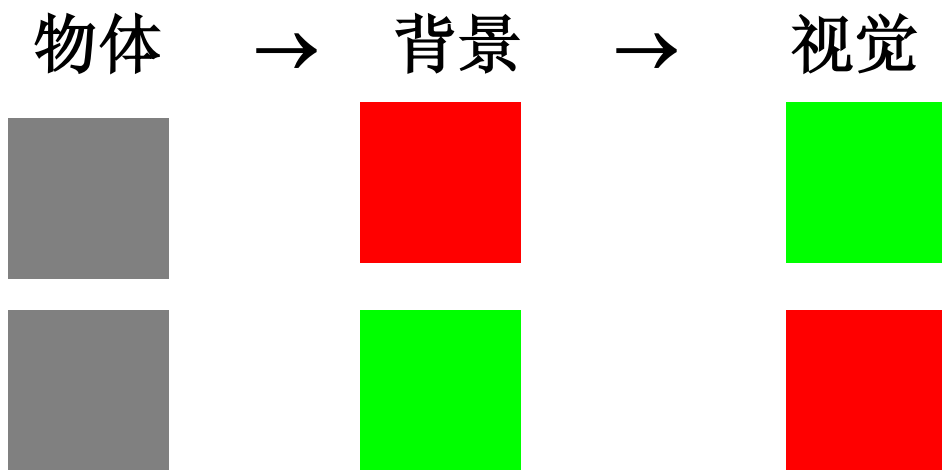
四个图像中那个目标显得亮？？？

亮度对比提示我们：

背景亮度不同，人眼所感受的主观亮度值也不一样。

同时对比效应会随着背景面积增大而显著；

色度对比：红色背景下的灰色物体显绿色；



相应地，绿色背景下的灰色物体显红色；

亮度对比计算公式： $C_r = |B - B_0| / B_0 * 100\%$;

式中， B 为物体亮度， B_0 为背景亮度；

举例：两幅完全相同的图像，物体圆的亮度均为50，背景亮度不同，人眼观察时哪一幅图像中的圆觉得更亮呢？

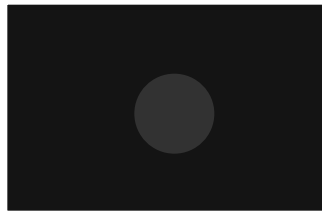


图1

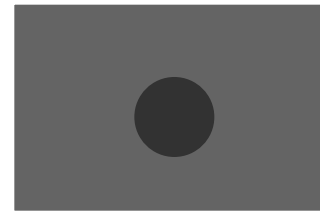


图2

图1中背景亮度为20，图2中背景亮度为100。

图1的 $C_r = \text{abs}(50 - 20) / 20 * 100\% = 150\%$ ；

图2的 $C_r = \text{abs}(50 - 100) / 100 * 100\% = 50\%$ ；

所以，图1中的目标比图2中的显得亮一些。

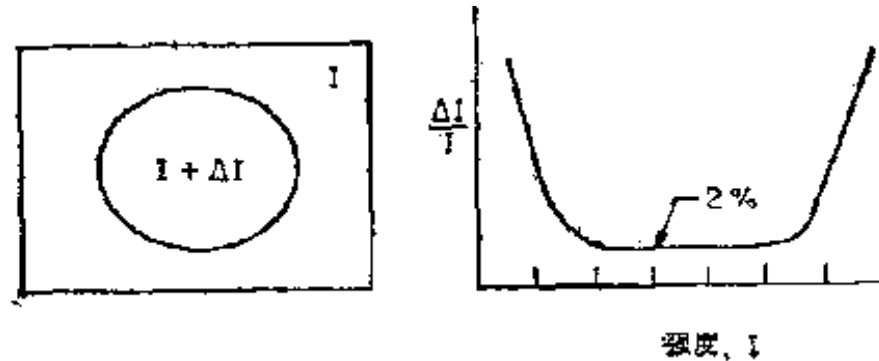
§ 2.1.3 视觉现象

二、对比灵敏度

在均匀照度背景 I 上，有一照度为 $I + \Delta I$ 的光斑，称眼睛刚好能分辨出的照度差 ΔI 与 I 的比 ($\Delta I / I$) 为**对比灵敏度**；

由于背景亮度 I 增大， ΔI 也需要增大，因此在相当宽的强度范围内，对比灵敏度是一个常数，约等于0.02，这个比值称为**韦伯比**(Weber比)。

亮度很强(弱)时不为常数。



无环境照度时:

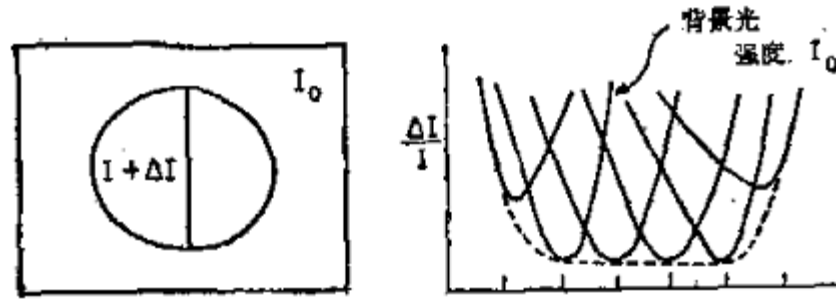
背景均匀照度 I

光斑照度为 $I + \Delta I$,眼睛刚能分辨出的照度差是 I 的函数;

当背景照度 I 增大时, 分辨出的光斑 ΔI 也增大;

韦伯比为0.02;

- 在中间强度范围内, $\Delta I / I$ 的数值为一常数2%。
- 在亮度很强或很弱时, 这个数值不保持为常数。



有环境照度时：

眼睛的对比灵敏度还与周围环境有关。

周围环境的照明强度为 I_0

设有两个相邻的光斑，一个强度为 I ，另一强度为 $I + \Delta I$ 。

$\Delta I / I$ 比值为常数的范围要大大减小，而且是环境照明强度 I_0 的函数

上图中曲线谷点的包络线与无环境照度曲线相同。



举例：背景亮度为100英尺朗伯时，人眼刚能分辨某一生物发光物体的亮度是多少？

根据对比灵敏度计算，得

$$I + \Delta I = 100 + 100 * 0.02 = 102$$

$$\text{或 } I - \Delta I = 100 - 100 * 0.02 = 98$$

§ 2.1.3 视觉现象

三、视觉系统的分辨率(不同领域分辨率含义不同)

人眼刚好能够鉴别空间上或时间上二相邻视觉信号存在的能力，称为视觉系统的分辨率。

用刚能分辨黑白线对数(1mm内)来定义**分辨率**。(与视网膜单位面积内分布的视细胞数有关，测量整体功能。)分辨率可用**视觉锐度**(空间域)、**调制传递函数**(频率域)来测度。

视觉锐度：能够鉴别最小空间模式的一种测度，用试验模式的视角 α 的倒数来定义锐度， α 以分为单位。

调制传递函数(MTF)： 定义为频域中输出频谱函数的绝对值与输入频谱函数的绝对值之比，MTF值介于0~1之间。

方法是输入沿水平方向按正弦方式变化的线栅，一张正弦光栅作为参考图，对比度和空间频率固定，另一张可变，作为测试图，让观察者在一定距离处看这两张正弦光栅。反复测试不同频率，得到视觉的MTF。

MTF具有带通滤波特性。

§ 2.1.3 视觉现象

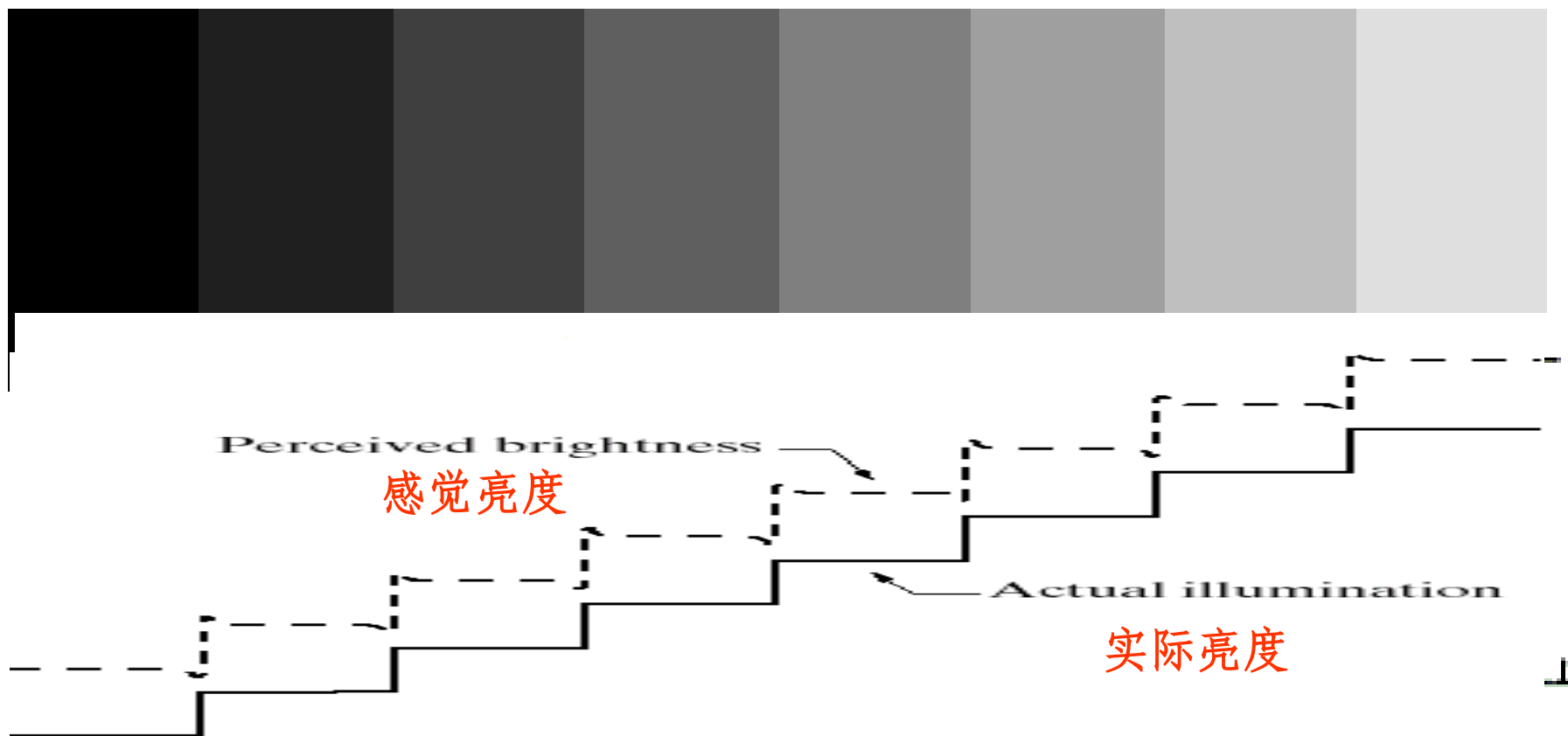
四、Mach带(Mach马赫1865年观察并讨论而得名)

在亮度变化部位附近的暗区和亮区中分别存在一条更黑和更亮的条带，称之为“马赫带”。

同时对比度是面积亮度差引起的现象，马赫带是明暗边界引起的现象。

侧抑制效应：视觉信号并不是单纯由一个视觉细胞感觉产生的，而是由相邻视觉细胞信号加权和形成的。

Mach带效应示意图



- 主观亮度曲线中每级阶梯的左边下降、右边上升

因此，**Mach带**可用侧抑制机理来解释。

可认为是局部空间域内神经细胞之间相互作用的结果。
(主观感觉的图像强度比实际的图像强度增加了一个分量，相当于对原图进行了二阶导数的操作。)

同时对比度和马赫带效应表明，人所感觉到的亮度并不是强度的简单函数。

结论：人的视觉系统是非线性和各向异性的。

§ 2.1.3 视觉现象

五、亮度适应级

亮度适应级：一个视觉系统当前的敏感度称之为亮度适应级。

人眼在某一时刻所能感觉到的主观亮度范围是以此适应级为中心的一个小范围。

亮光适应：暗处到亮处的亮度适应能力，约1-2秒。

暗光适应：亮处到暗处的亮度适应能力，约20-30秒。

§ 2.1.3 视觉现象

六、主观轮廓和空间错觉

错觉是由多个视觉细胞复杂的全局相互联系所引起；

主观轮廓：例如边界并不存在，主观上感知存在。

如直线围成的圆；

空间错觉：物体的整体面貌和结构影响人对它的感知，

与大脑功能有关；

一类是基于形状和方向的错觉；

一类是基于长度和面积的错觉；

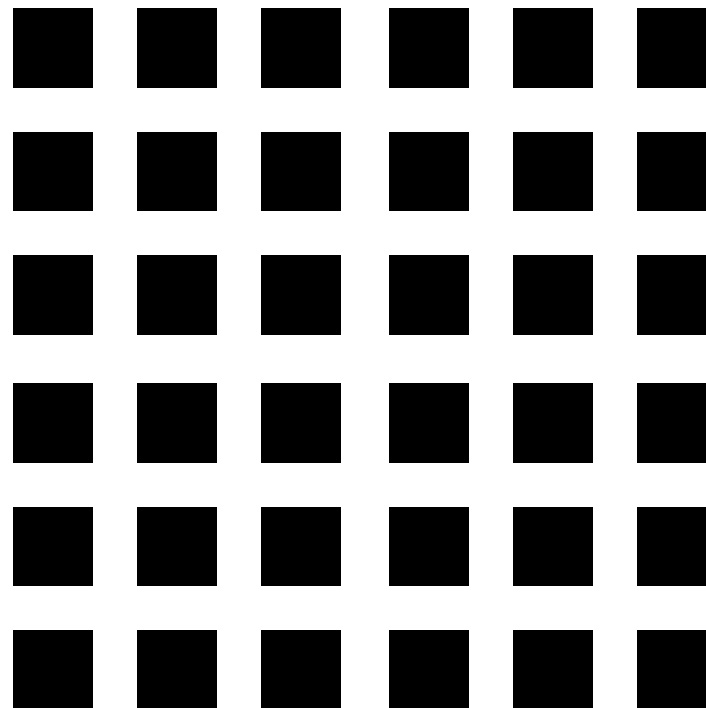
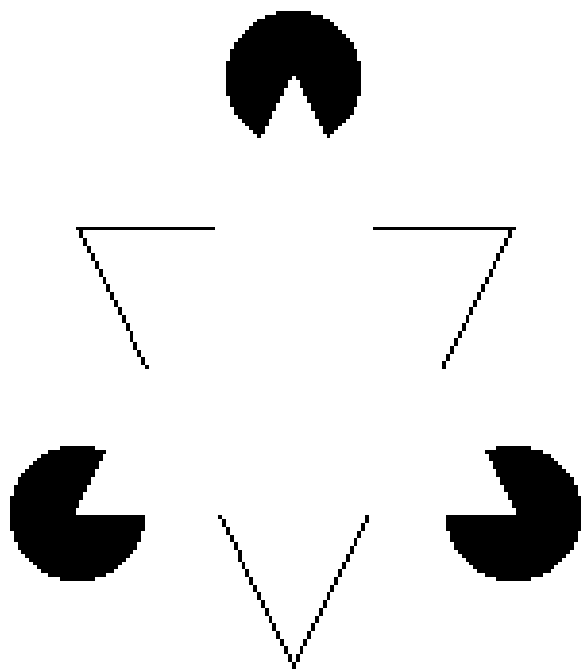


HUAZHONG UNIVERSITY OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Wuhan, 430074, P.R. China

華中科技大學

中華人民共和國 湖北 武漢







HUAZHONG UNIVERSITY OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Wuhan, 430074, P.R. China

華中科技大學

中華人民共和國 湖北 武漢

知學知角





HUZHONG UNIVERSITY OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

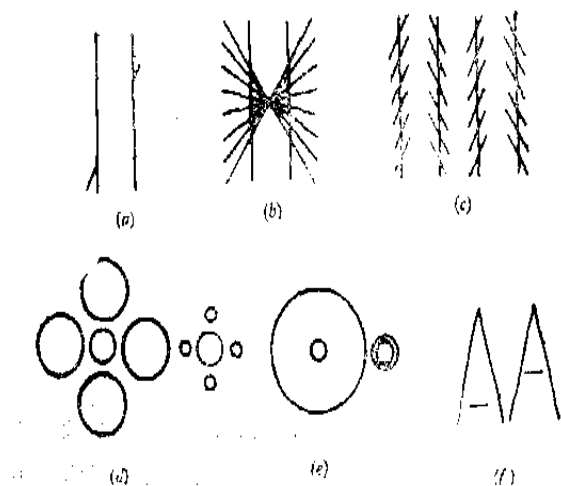
Wuhan, 430074, P.R. China

華中科技大學

中華人民共和國 湖北 武漢

视觉现象





古代希腊艺术家意识到空间错觉，在建筑设计中引入补偿校正技术以保持对物体及感觉的对称性。

产生错觉的解释尚需对大脑功能进一步的认识后才能得到满意的解释。

§ 2.2 光和电磁波谱

眼睛中图像的形成包括两方面：

- 光的物理过程

光的物理过程介绍光源的辐射度量；

- 人对视觉刺激的反应

人对视觉刺激的反应-主观视觉强度；

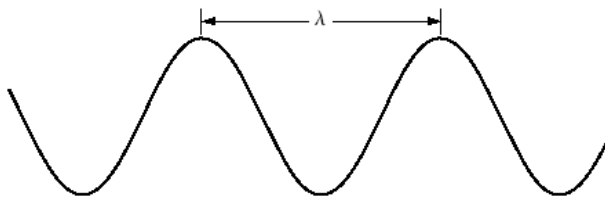
以下简单介绍(1)光源的辐射度量；(2)光度学。

§ 2.2.1 光源的辐射度量

一、可见光

可见光占电磁波的一小部分。可用波长、频率来描述。

1. 波长：



波长从390nm（纳米）-- 770nm。

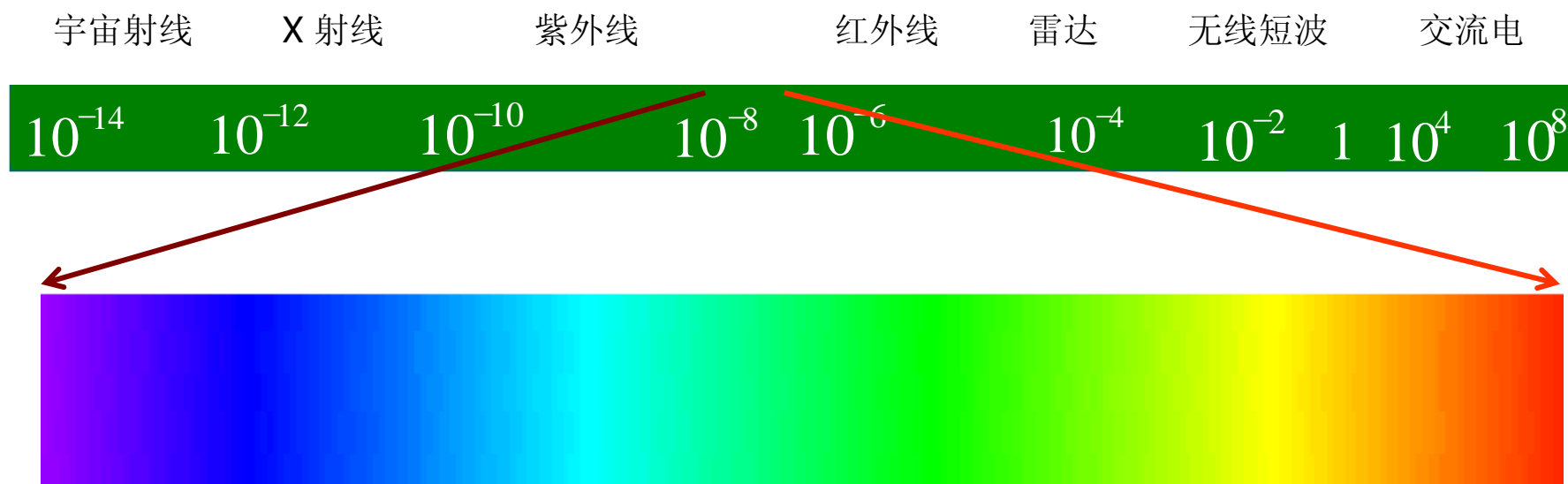
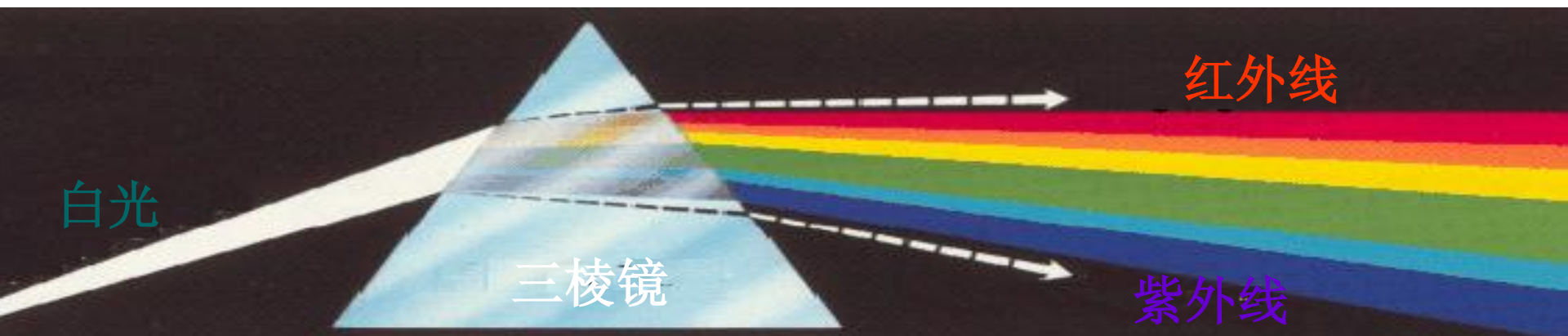
紫光 → 蓝光 → 红光

人由可见光而引起视觉，看到图像，感受到大千世界。

赤橙黄绿青蓝紫，参见光和电磁波谱图。

• 1666年，牛顿发现

三棱镜



可见光：390nm-770nm = 0.4 – 0.77微米

2. 光函数

用光函数 $C(x, y, t, \lambda)$ 表示可见光， C 为一连续函数。

式中： x, y 为空间分布(坐标)；

t 为时间分布；

λ 为波长；

即图像源是能量在空间和时间上的分布；

λ x, y t

能量 $E = h\nu$ ； 其中： h 是普朗克常数； ν 是频率； $\nu = c/\lambda$ ；

c 是光速(299792458m/s 约3000000km/s)；

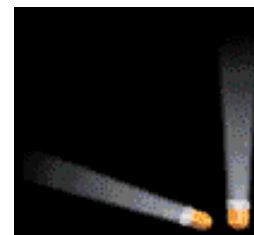
能量单位是电子伏特eV；

3. 人眼及各种传感器接受到的图像信息为：

$$F_i(x, y, t) = \int C(x, y, t, \lambda) S_i(\lambda) d\lambda$$

其中， $F_i(x, y, t)$ 为第*i*个传感器接受的信息
 $S_i(\lambda)$ 为第*i*个传感器的光谱特性

不同的传感器对不同的波段敏感，多种传感器可以综合采集，得到同一景物在不同波谱上辐射能量所成的像。



二、光源的辐射特性—辐射强度

对以光辐射生成的图像，了解该特性很重要。

光辐射的能源可用 $r(\lambda)$ 表示；

能谱分布 $r(\lambda)$ ：辐射源在单位时间内、在每一波长间隔上所辐射的能量；

辐射功率 $P = \int r(\lambda) d\lambda$ ，亦称辐射通量或辐射量，单位为瓦。

光通量：光源以电磁波的形式辐射出的光功率，称为光通量；单位为流明 lm 。(如投影仪指标 $1000 lm$)。

辐照度(照度)：照射在单位面积上的光通量；单位为勒 lx ，是光源对物体辐射的一种度量。

图像一般是对物体上的照度成分 i 和反射成分 r 进行度量得出的；

$$\text{即 } f(x, y) = i(x, y)r(x, y) \quad ;$$

$f(x, y)$ 为图像在该点的亮度值；或灰度级。

§ 2.2.2 光度学

光度学：定量描述可见光波能量引起的主观亮度(感知明亮度)。

一、视见函数 $\phi(\lambda)$ ：

描述视网膜在光能量刺激下对不同波长光线的敏感性。即人眼光谱响应的特性。

$\phi(\lambda)$ 采用间接比较法测量获得，等价于传感器函数。

二、主观视觉强度（亮度）

$$F(x, y, t) = \int C(x, y, t, \lambda) \phi(\lambda) d\lambda$$

图像是一个**2D**亮度函数。

§ 2.2.3 单色视觉模型

没有颜色的光叫消色或单色光。

单色视觉模型由一个低通滤波器后接一个高通滤波器组成，它是一种线性模型。

低通滤波器模拟人眼的光学系统（积分特性）

高通滤波器则反映侧抑制引起的Mach带效应。



模型改进：考虑视觉的亮度恒定现象，即物体和背景的亮度在很宽的范围同时变化时，人对物体的亮度感觉保持不变。

模拟该现象的方法是在高通滤波器之前增加对数操作，采用非线性模型来模拟。

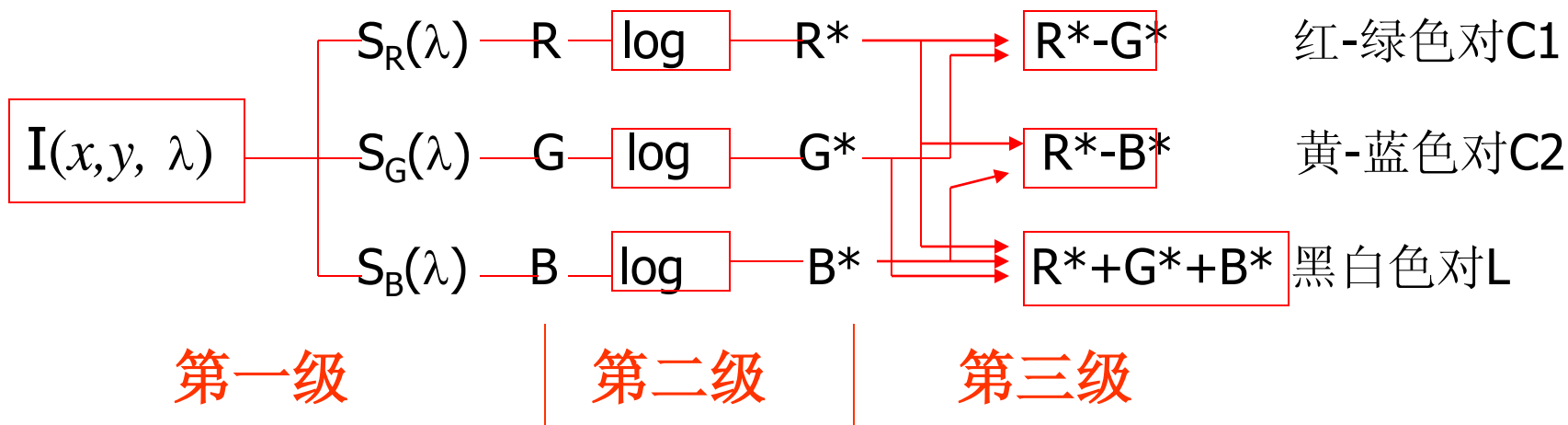
典型视觉系统模型如下：



§ 2.2.4 彩色视觉三级模型

设 $I(x, y, \lambda)$ 为图像亮度函数， x, y 为空间坐标， λ 为光的波长。

彩色视觉三级模型是彩色模型的一种，定义如下：



第一级： R, G, B 代表三彩色刺激值， S_R, S_G, S_B 为彩色滤波器

§ 2.2.4 彩色视觉模型(续)

$$R(x,y) = \int_{\lambda} I(x,y, \lambda) S_R(\lambda) d\lambda$$

$$G(x,y) = \int_{\lambda} I(x,y, \lambda) S_G(\lambda) d\lambda$$

线性关系

$$B(x,y) = \int_{\lambda} I(x,y, \lambda) S_B(\lambda) d\lambda$$

第二级：对数函数表示视觉细胞对光强的**非线性响应**，即

$$R^*(x,y) = \log R(x,y)$$

$$G^*(x,y) = \log G(x,y)$$

$$B^*(x,y) = \log B(x,y)$$

第三级：对立模型，处理相互对立的成对彩色。

（线性关系）

$$L = c[R^* + G^* + B^*] = c[\log R + \log G + \log B] \quad \text{亮度输出}$$

$$C1 = a[R^* - G^*] = a[\log (R / G)] \quad \text{彩色输出}$$

$$C2 = b[R^* - B^*] = b[\log (R / B)] \quad \text{彩色输出}$$

式中：a、b、c是常数；

将彩色视觉三级模型化简可得单色视觉模型(C1、C2为0)。