

Hunt 模型

这一章继续回顾一些广泛讨论和应用的色貌模型，重点介绍了由 Robert William Gainer Hunt 开发的模型。这个模型是迄今为止开发的最为广泛、完整和复杂的色貌模型。其理论根基可以追溯到 Hunt 在 1952 年的早期色适应研究 (Hunt 1952)，并在 1980 年代和 1990 年代得到了严格的发展 (Hunt 1982, 1987, 1991b, 1994, 1995, Hunt 和 Pointer 1985)。该模型对 CIECAM02 的发展和设计产生了深远影响。

Hunt 色貌模型并不简单，但它被设计用于预测一系列视觉现象。正如 Hunt 本人所言，人的视觉系统也并非简单。因此，尽管在某些应用中，后续章节中描述的简单模型已足够，但拥有一个完整的模型，能够适应更广泛的观测条件，对于更明确或不寻常的情况来说无疑具有很大的价值。Hunt 模型恰好满足了这一需求，并且本书中讨论的大多数其他色貌模型，都能追溯到 Hunt 模型中最初提出的许多理念。

12.1 目标与方法

Hunt 在柯达研究实验室度过了他职业生涯中的 36 年。因此，Hunt 模型是在色彩图像再现的需求背景下开发的。这与第 11 章中讨论的 Nayatani 等人模型的照明工程领域的视角有显著不同。通过检查 Hunt 模型的输入参数，可以轻易看出成像科学对该模型的影响。例如，环境相对亮度是一个在 Nayatani 等人模型中不存在的重要因素。其他例子可以在为“在暗室投影的透明片”、“在昏暗环境中的电视显示”或“正常场景”设定特定值的参数中找到。这些特性清晰地表明，Hunt 模型是为了应用于成像情境而设计的。

然而，这并不是该模型适用范围的极限。例如，它还被扩展到与传统视觉科学实验中使用的无关色彩。Hunt 模型旨在预测一系列视觉现象，包括在不同背景、环境、照明颜色和亮度级别（从低视网膜亮度到漂白水平）下相关和无关色彩的外观。在这个意义上，它是一个完整的色貌模型，适用于静态刺激。像本书中描述的大多数其他模型一样，Hunt 模型并不试图涵盖外观的复杂空间或时间特性。

为了在如此广泛的条件下做出合理的外观预测，Hunt 模型要求对观察场的定义更加严格。因此，Hunt (1991b) 定义了观察场的组成部分，如第 7 章所述。这些组成部分包括刺激物、近端场、背景和环境。Hunt 模型是唯一一个单独处理这些观察场组成部分的模型。

尽管 Hunt 模型在过去的二十年里一直在不断发展（有关重要进展，请参见 Hunt 1982, 1985, 1987, 1991b 和 1994），该模型当前表述的全面回顾可以在 Hunt 的书籍《色彩再现》第五版的第 31 章中

找到 (Hunt 1995)。以下内容改编自该章节。有兴趣深入了解 Hunt 模型的读者，应该参考 Hunt 书中的第 31 章。

12.2 输入数据

Hunt 模型需要大量的输入数据。所有的色度坐标通常使用 CIE 1931 标准色度观察者 (2°) 来计算。需要提供照明源和适应场的色度坐标 (x,y)。通常，适应场被视为场景的综合色度，假设其与照明源的色度相同。

接下来，需要提供背景、近端场、参考白和测试样品的色度坐标 (x,y) 和亮度因子 (Y)。如果没有单独的数据用于近端场，通常假设它与背景相同。此外，参考白通常假设与照明源具有相同的色度，并且其亮度因子为 100 (如果没有具体数据的话)。所有这些数据都是相对的色度值。

为了预测一些依赖亮度的外观现象，还需要绝对亮度水平。因此，需要提供参考白和适应场的绝对亮度水平 (单位: cd/m²)。如果适应场的具体亮度数据不可得，则假设适应场的亮度为参考白亮度的 20%，假定场景的平均反射率为 0.2。

此外，还需要视网膜亮度数据，以便将视杆细胞响应纳入模型 (这是 Hunt 模型的另一个独特特征)。因此，需要提供适应场的视网膜亮度 (单位: 视网膜 cd/m²)。由于视网膜亮度数据很少，通常可以通过照明源的视网膜亮度 LAS 来近似计算，公式如下：

$$L_{AS} = L_A - 2.26 \left(\frac{4000}{T} \right)^{1/3}$$

测试刺激相对于参考白的视网膜亮度也需要提供。同样，由于这些数据也很少可用，通常会使用样本与参考白的视网膜亮度比值代替视网膜亮度数据。

最后，还有一些输入变量需要根据观察配置来确定。其中两个是色度 (Nc) 和亮度 (Nb) 环境诱导因子。Hunt (1995) 建议为特定的观察情境优化这些值。由于通常无法做到这一点，建议使用表 12.1 中列出的名义值。

最后两个输入参数是色度 (Ncb) 和亮度 (Nbb) 背景诱导因子。同样，Hunt 推荐优化的值。如果没有这些值，可以根据参考白的亮度 (Y_W) 和背景的亮度 (Y_b) 使用以下公式计算背景诱导因子：

$$N_{cb} = 0.2 \left(\frac{Y_W}{Y_b} \right)^{0.725}$$

$$N_{bb} = 0.2 \left(\frac{Y_W}{Y_b} \right)^{0.725}$$

表 12.1 色度和亮度环境诱导因子值

情境	Nc	Nb
均匀背景和环境中的小区域	1.0	300
正常场景	1.0	75
昏暗环境中的电视和 CRT 显示器	1.0	25
光箱上的大透明片	0.7	25
昏暗环境中的投影透明片	0.7	1

最后，还需要做出关于“忽略照明源”参数的决定。模型中的某些参数在发生忽略照明源的情境下需要赋予不同的值。得到以上所有数据后，便可以继续进行 Hunt 模型参数的计算。

12.3 适应模型

在本书所描述的所有模型中，第一步都是将 CIE 三刺激值转换为视锥细胞响应。在 Hunt 模型中，视锥细胞响应用 ρ 、 γ 和 β 来表示，而不是传统的 LMS。所使用的转换（称为 Hunt-Pointer-Estevéz 转换）如方程 (12.4) 所示。

$$\begin{bmatrix} \rho \\ \gamma \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.38971 & 0.68898 & -0.07868 \\ -0.22981 & 1.18340 & 0.04641 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (12.4)$$

在 Hunt 模型中，这个转换经过归一化处理，使得均能光照下的 ρ 、 γ 和 β 值相等。在其他一些模型中，可能会使用不同的归一化方式。

转换从 XYZ 到 $\rho\gamma\beta$ 的值需要对参考白、背景、临近场和测试刺激分别进行计算。Hunt 色貌模型中的色适应模型是 von Kries 假说的显著改进形式。适应后的视锥细胞信号 ρ_a 、 γ_a 和 β_a ，通过以下

方程从刺激的视锥细胞响应 ρ 、 γ 和 β 以及参考白的视锥细胞响应 ρ_W 、 γ_W 和 β_W 计算。

$$\rho_a = B_\rho \left[f_n \left(\frac{F_L F_\rho \rho}{\rho_W} \right) + \rho_D \right] + 1 \quad (12.5)$$

$$\gamma_a = B_\gamma \left[f_n \left(\frac{F_L F_\gamma \gamma}{\gamma_W} \right) + \gamma_D \right] + 1 \quad (12.6)$$

$$\beta_a = B_\beta \left[f_n \left(\frac{F_L F_\beta \beta}{\beta_W} \right) + \beta_D \right] + 1 \quad (12.7)$$

von Kries 假说在这些方程中体现为核心比值 ρ/ρ_W 、 γ/γ_W 和 β/β_W 。显然，这些方程中还包含许多其他参数，需要进行定义和解释。

函数 $f_n(I)$ 是一个广义双曲函数，用于模拟视觉系统的非线性行为。其表达式如下：

$$f_n(I) = 40 \left(\frac{I^{0.73}}{I^{0.73} + 2} \right) \quad (12.8)$$

该函数的特性如图 12-1 所示。在对数-对数坐标下，这个函数在中间操作范围内呈现线性，接近一个简单的幂函数（指数约为 1/2）。在低光照水平下，函数的斜率逐渐增加，模拟阈值行为；在高光照水平下，斜率逐渐下降至 0，模拟饱和行为。

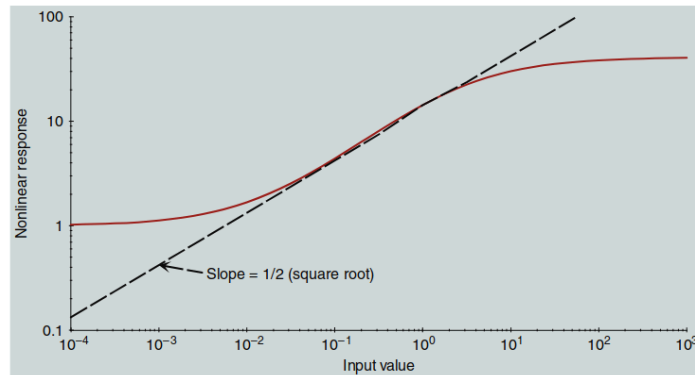


图 12.1: Hunt 色貌模型的非线性响应函数 $f_n(I)$ 。

亮度水平适应因子 F_L

亮度水平适应因子 F_L 被引入到适应模型中，用于预测在不同亮度水平下光适应的整体行为。它还重新引入了非线性之前的绝对亮度水平，从而能够预测 Stevens 效应和 Hunt 效应等外观现象。 F_L 由以下方程计算：

$$F_L = 0.2k^4(5L_A) + 0.1(1 - k^4)^2(5L_A)^{1/3} \quad (12.9)$$

其中， k 的计算公式为：

$$k = \frac{1}{5L_A + 1} \quad (12.10)$$

色适应因子 F_ρ 、 F_γ 和 F_β

色适应因子 F_ρ 、 F_γ 和 F_β 用于模拟色适应的不完全性。这些因子的设计使得对于均能光照（通常称为光源 E），色适应始终是完全的，即 F_ρ 、 F_γ 和 F_β 均等于 1。随着适应场颜色纯度的增加或亮度水平的降低，色适应的完整性会减弱。色适应因子的公式如下：

$$F_\rho = \frac{1 + L_A^{1/3} + h_\rho}{1 + L_A^{1/3} + 1/h_\rho} \quad (12.11)$$

$$F_\gamma = \frac{1 + L_A^{1/3} + h_\gamma}{1 + L_A^{1/3} + 1/h_\gamma} \quad (12.12)$$

$$F_\beta = \frac{1 + L_A^{1/3} + h_\beta}{1 + L_A^{1/3} + 1/h_\beta} \quad (12.13)$$

其中， h_ρ 、 h_γ 和 h_β 的计算公式如下：

$$h_\rho = \frac{3\rho_W}{\rho_W + \gamma_W + \beta_W} \quad (12.14)$$

$$h_\gamma = \frac{3\gamma_W}{\rho_W + \gamma_W + \beta_W} \quad (12.15)$$

$$h_\beta = \frac{3\beta_W}{\rho_W + \gamma_W + \beta_W} \quad (12.16)$$

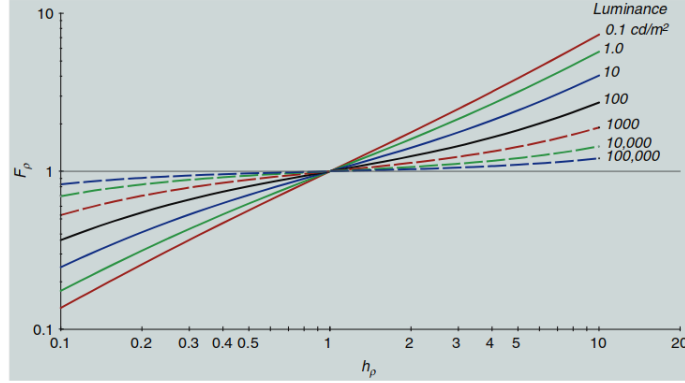


图 12.2: 色适应因子 F_ρ 随适应色彩纯度和亮度水平的变化。

Helson-Judd 效应修正项

在 Hunt 模型中，为了预测 **Helson-Judd 效应**，引入了修正项 ρ_D 、 γ_D 和 β_D 。Helson-Judd 效应描述了背景亮度和参考白亮度之间的关系如何影响颜色感知。它通过对视锥细胞信号进行加性修正来反映这种影响。方程 (12.17) 到 (12.19) 描述了这些修正项的计算方法。

$$\rho_D = f_n \left[\left(\frac{Y_b}{Y_W} \right) F_L F_\gamma \right] - f_n \left[\left(\frac{Y_b}{Y_W} \right) F_L F_\rho \right] \quad (12.17)$$

$$\gamma_D = 0.0 \quad (12.18)$$

$$\beta_D = f_n \left[\left(\frac{Y_b}{Y_W} \right) F_L F_\gamma \right] - f_n \left[\left(\frac{Y_b}{Y_W} \right) F_L F_\beta \right] \quad (12.19)$$

这些修正项中：

- Y_b 是背景的亮度。
- Y_W 是参考白的亮度。
- F_L 是亮度水平适应因子。
- F_ρ 、 F_γ 和 F_β 是色适应因子。
- f_n 是 Hunt 模型中用于模拟视觉非线性响应的双曲函数。

在典型的观测条件下，Helson-Judd 效应并不显著 (Helson 1938)。在这种情况下，修正项 ρ_D 、 γ_D 和 β_D 可以设置为 0.0。此外，当发生完全色适应 (discounting-the-illuminant) 时，色适应因子 F_ρ 、 F_γ 和 F_β 会被设置为 1.0，Helson-Judd 效应也不会出现，修正项 ρ_D 、 γ_D 和 β_D 也会被强制为 0.0。

视锥细胞漂白因子

当光照水平达到非常高的亮度时，视锥细胞会发生漂白 (photopigment bleaching)，导致视觉系统的输出降低。Hunt 模型引入了漂白因子 B_ρ 、 B_γ 和 B_β 来模拟这种现象。这些漂白因子随着适应亮度 L_A 的增加而逐渐减小，如方程 (12.20) 到 (12.22) 所示。

$$B_\rho = \frac{10^7}{10^7 + 5L_A \left(\frac{\rho_W}{100} \right)} \quad (12.20)$$

$$B_\gamma = \frac{10^7}{10^7 + 5L_A \left(\frac{\gamma_W}{100} \right)} \quad (12.21)$$

$$B_\beta = \frac{10^7}{10^7 + 5L_A \left(\frac{\beta_W}{100} \right)} \quad (12.22)$$

这些漂白因子在正常亮度条件下接近 1.0，因此对视觉响应的影响很小。但当亮度水平极高时，例如在阳光明媚的室外环境下，漂白因子会显著降低，导致视锥细胞的输出减少。这种现象解释了在强光下视觉系统感知范围的减小，因此人们常常需要佩戴墨镜来降低光线对视觉的影响。

调整参考白信号

在 Hunt 模型中，还引入了对参考白信号的调整，以考虑背景和临近场的影响。调整后的参考白信号 ρ'_W 、 γ'_W 和 β'_W 可以通过方程 (12.23) 到 (12.28) 计算。这个调整过程使得色适应不仅依赖于参考

白，还受到背景和临近场颜色的影响。

$$\rho'_W = \rho_W \left[\frac{(1-p)p_\rho + (1+p)/p_\rho}{(1+p)p_\rho + (1-p)/p_\rho} \right]^{1/2} \quad (12.23)$$

$$\gamma'_W = \gamma_W \left[\frac{(1-p)p_\gamma + (1+p)/p_\gamma}{(1+p)p_\gamma + (1-p)/p_\gamma} \right]^{1/2} \quad (12.24)$$

$$\beta'_W = \beta_W \left[\frac{(1-p)p_\beta + (1+p)/p_\beta}{(1+p)p_\beta + (1-p)/p_\beta} \right]^{1/2} \quad (12.25)$$

其中， p_ρ 、 p_γ 和 p_β 分别表示临近场和背景之间的比值：

$$p_\rho = \frac{\rho_p}{\rho_b} \quad (12.26)$$

$$p_\gamma = \frac{\gamma_p}{\gamma_b} \quad (12.27)$$

$$p_\beta = \frac{\beta_p}{\beta_b} \quad (12.28)$$

这些调整使得 Hunt 模型可以更加精确地模拟在复杂视野条件下的色彩感知变化。

12.4 对立色维度

在获得适应后的视锥细胞信号 ρ_a 、 γ_a 和 β_a 之后，可以通过简单的方式计算对立类型的视觉响应。方程 (12.29) 到 (12.32) 给出了这些计算方法。

亮度（无色）响应信号

适应后的无色响应信号 A_a 是通过对视锥细胞信号进行加权求和得到的，这些权重反映了视网膜中不同类型视锥细胞的相对数量。同时，方程中减去 3.05 和加上 1.0 的操作，分别表示去除早期噪声成分并添加新的噪声成分。

$$A_a = (\rho_a + \gamma_a + \beta_a) - 3.05 + 1.0 \quad (12.29)$$

色彩对立信号

色彩对立信号 C_1 、 C_2 和 C_3 分别表示所有可能的视网膜中产生的对立色信号。这些信号可能并不直接对应于具体的生理结构，但在模型中作为方便的数学表达式来使用，以便构建更传统的对立色响应。

$$C_1 = \rho_a - \gamma_a \quad (12.30)$$

$$C_2 = \gamma_a - \beta_a \quad (12.31)$$

$$C_3 = \beta_a - \rho_a \quad (12.32)$$

解释

1. A_a 无色响应信号：

该信号通过将适应后的视锥细胞信号 ρ_a 、 γ_a 和 β_a 相加并进行修正得到，反映了整体亮度感知。

2. C_1 色彩对立信号：

这个信号表示红-绿通道的对立关系，通过适应后的视锥细胞信号 ρ_a 和 γ_a 的差值计算。

3. C_2 色彩对立信号：

该信号表示绿-蓝通道的对立关系，通过适应后的视锥细胞信号 γ_a 和 β_a 的差值计算。

4. C_3 色彩对立信号：

这个信号表示蓝-红通道的对立关系，通过适应后的视锥细胞信号 β_a 和 ρ_a 的差值计算。

这些色彩对立信号的组合提供了一种方便的数学形式，用于构建更复杂的对立色响应模型。这些模型在视觉科学中被广泛用于解释色彩感知现象。

12.5 色相

在 Hunt 色貌模型中，一旦确定了红-绿和黄-蓝的对立色维度，就可以计算色相角度。红-绿和黄-蓝对立色维度是色彩差异信号 C_1 、 C_2 和 C_3 的合适组合（如方程 12.30 到 12.32 所示）。色相角度 h_s 的计算如方程 (12.33) 所示。

$$h_s = \tan^{-1} \left[\frac{(C_2 - C_3)/2}{C_1 - (C_2 + C_3)/4.5} \right] \quad (12.33)$$

色相四分值 H

给定色相角度 h_s ，可以通过在特定色相角度之间进行插值来计算色相四分值 H 。在插值过程中，还需要考虑偏心因子 e_s 。插值函数如方程 (12.34) 所示：

$$H = H_1 + \left[\frac{100(h_s - h_1)}{(h_2 - h_1) + (e_1(h_2 - h_1) + e_2(h_s - h_1))} \right] \quad (12.34)$$

在这个公式中：

- H_1 ：根据色相角度最接近且小于测试样本的唯一色相，取值为 0（红）、100（黄）、200（绿）或 300（蓝）。
- h_1 和 e_1 ：从表 12.2 中选取，代表具有最接近且小于 h_s 的唯一色相的角度和偏心因子。
- h_2 和 e_2 ：从表 12.2 中选取，代表具有最接近且大于 h_s 的唯一色相的角度和偏心因子。

色相组成 HC

色相组成 HC 直接从色相四分值 H 计算，和第 11 章中 Nayatani 等人的模型相似。色相组成以两个唯一色相的百分比表示，描述了测试样本色相的组成。

偏心因子 e_s

偏心因子 e_s 是用于进一步计算外观相关值的参数。可以通过线性插值，根据测试样本的色相角度 h_s 和表 12.2 中的数据来确定 e_s 。

表 12.2：唯一色相的色相角度 h_s 和偏心因子 e_s

唯一色相	h_s	e_s
红 (Red)	20.14	0.8
黄 (Yellow)	90.00	0.7
绿 (Green)	164.25	1.0
蓝 (Blue)	237.53	1.2

计算步骤总结

1. 计算色相角度 h_s :
使用方程 (12.33) 计算色相角度 h_s 。
2. 确定插值参数:
从表 12.2 中选取最接近 h_s 的两个唯一色相角度 h_1 和 h_2 以及对应的偏心因子 e_1 和 e_2 。
3. 计算色相四分值 H :
使用方程 (12.34) 进行插值, 得到色相四分值 H 。
4. 计算色相组成 HC :
根据色相四分值 H , 确定色相由两个唯一色相的组成百分比。
5. 计算偏心因子 e_s :
使用线性插值方法, 计算测试样本的偏心因子 e_s 。

这些步骤确保了 Hunt 模型能够精确地描述和预测色相的感知及其组成。

12.6 饱和度

为了计算饱和度的相关值, 首先需要根据色彩差异信号计算黄-蓝响应和红-绿响应。这些响应通过方程 (12.35) 和 (12.36) 进行计算。

黄-蓝响应 M_{YB}

黄-蓝响应 M_{YB} 通过下式计算:

$$M_{YB} = \left[\left(\frac{C_2 - C_3}{2} \right) \left(\frac{10}{100} \right) \left(\frac{4.5}{13} \right) F_t \right] (N_c N_{cb}) \quad (12.35)$$

红-绿响应 M_{RG}

红-绿响应 M_{RG} 通过下式计算：

$$M_{RG} = \left[\left(\frac{C_1}{2} \right) \left(\frac{10}{100} \right) \left(\frac{11}{13} \right) \right] (N_c N_{cb}) \quad (12.36)$$

在以上方程中：

- C_1 、 C_2 、 C_3 ：由方程 (12.30) 到 (12.32) 计算得到的色彩差异信号。
- N_c ：色彩环境诱导因子。
- N_{cb} ：背景色彩诱导因子。
- F_t ：低亮度三色盲因子，由方程 (12.37) 计算。

低亮度三色盲因子 F_t

低亮度三色盲 (Low-luminance Tritanopia) 现象是指在低亮度下，观察者会逐渐表现出蓝-黄辨别缺陷。这是因为短波长敏感视锥细胞 (S视锥细胞) 的亮度阈值高于其他两类视锥细胞。

$$F_t = \frac{L_A}{L_A + 0.1} \quad (12.37)$$

在方程 (12.37) 中， L_A 是适应亮度。当 L_A 处于典型亮度水平时， F_t 接近 1.0；当 L_A 接近 0 时， F_t 接近 0，使得黄-蓝响应在低亮度下减小。

总体色彩响应 M

通过黄-蓝响应 M_{YB} 和红-绿响应 M_{RG} ，可以计算总体色彩响应 M 。该计算是通过二者的平方和的平方根得到的，如方程 (12.38) 所示：

$$M = (M_{YB}^2 + M_{RG}^2)^{1/2} \quad (12.38)$$

饱和度 s

饱和度 s 是通过总体色彩响应 M 和适应后的视锥细胞信号之和计算得到的。方程 (12.39) 给出了饱和度的定义：

$$s = \frac{50M}{\rho_a + \gamma_a + \beta_a} \quad (12.39)$$

在这个公式中：

- M ：总体色彩响应，表示色彩的丰富程度。
- ρ_a 、 γ_a 和 β_a ：适应后的视锥细胞信号，表示刺激的亮度。

解释

1. 黄-蓝响应 M_{YB} ：

通过色彩差异信号 C_2 和 C_3 计算，反映了刺激中黄-蓝对立色的强度。

2. 红-绿响应 M_{RG} ：

通过色彩差异信号 C_1 计算，反映了刺激中红-绿对立色的强度。

3. 低亮度三色盲因子 F_t ：

在低亮度水平下，模拟蓝-黄辨别能力的降低。

4. 总体色彩响应 M ：

将黄-蓝和红-绿响应组合在一起，表示刺激的整体色彩感知。

5. 饱和度 s ：

饱和度定义为刺激鲜艳度相对于其自身亮度的比值。总体色彩响应 M 近似表示鲜艳度，而适应后视锥细胞信号的和近似表示刺激的亮度。

这种计算方法使得 Hunt 模型能够在广泛的亮度水平和不同环境条件下，准确地预测色彩饱和度的感知。

12.7 亮度

为了推导亮度和明度的相关值，需要进一步发展无色响应信号。Hunt 色貌模型设计用于在整个亮度范围内工作，因此需要考虑在低亮度水平下起作用的 **视杆细胞** (rod photoreceptors) 的响应。视杆细胞响应会影响无色信号，从而间接影响彩度和鲜艳度的预测。

适应后的视杆细胞信号 A_S

适应后的视杆细胞响应信号 A_S 如方程 (12.40) 所示:

$$A_S = B_S f_n \left[\left(\frac{S}{S_W} \right) F_{LS} \right] + 3.05 - 0.3 \quad (12.40)$$

在方程 (12.40) 中:

- S : 刺激的视杆细胞响应。
- S_W : 参考白的视杆细胞响应。
- f_n : 非线性光感受器响应函数 (方程 12.8)。
- F_{LS} : 视杆细胞亮度水平适应因子, 由方程 (12.41) 和 (12.42) 给出。
- B_S : 视杆细胞漂白因子, 由方程 (12.43) 计算。
- **3.05**: 缩放因子。
- **0.3**: 视杆细胞的噪声水平。

视杆细胞亮度水平适应因子 F_{LS}

视杆细胞亮度水平适应因子 F_{LS} 如下所示:

$$F_{LS} = 0.2 \left(55L_A^{1/6} + 3800L_A^4 \right) / (1 + 2.26L_A^2) \quad (12.41)$$

其中, $j(L_A)$ 为:

$$j(L_A) = \frac{L_A}{L_A + 0.00001} \quad (12.42)$$

视杆细胞漂白因子 B_S

视杆细胞漂白因子 B_S 用于在亮度水平增加时减少视杆细胞对整体色貌的贡献。其计算公式为:

$$B_S = \left[0.5 + \left(\frac{0.3S_W + 5L_A/2.26}{0.5 + 5L_A/2.26} \right) \right] \quad (12.43)$$

总体无色信号 A

有了无色视锥细胞信号 A_a (方程 12.29) 和适应后的视杆细胞信号 A_S (方程 12.40), 可以通过方程 (12.44) 计算总体无色信号 A :

$$A = [(A_a - 1.0)^2 + (A_S - 0.3)^2]^{1/2} \quad (12.44)$$

亮度相关值 Q

亮度相关值 Q 将总体无色信号 A 与总体色彩响应 M 结合起来, 以便准确建模 **Helmholtz-Kohlrausch** 效应。计算公式如下:

$$Q = (A + 0.6M)(N_1 - N_2) \quad (12.45)$$

在方程 (12.45) 中:

- N_1 和 N_2 : 围绕环境的亮度感知因子。

围绕环境亮度感知因子 N_1 和 N_2

N_1 和 N_2 的计算公式如下:

$$N_1 = 0.5 + 0.13 \left(\frac{A_W}{N_b} \right) \quad (12.46)$$

$$N_2 = 0.362 \left(\frac{A_W}{200N_b} \right) \quad (12.47)$$

在这些方程中:

- A_W : 参考白的无色信号。
- N_b : 亮度环境诱导因子。

白度-黑度 Q_{WB}

Hunt 模型中还可以计算 **白度-黑度** (Q_{WB})，这是一种双极值，用于表示黑色物体在适应亮度增加时变得更暗，而白色物体变得更亮（这也是 **Stevens 效应** 的一种表现）。 Q_{WB} 的计算公式如下：

$$Q_{WB} = Q - 0.7Q_b^{0.7} \quad (12.48)$$

解释

1. 适应后的视杆细胞信号 A_S ：

考虑了在低亮度水平下视杆细胞的响应。

2. 总体无色信号 A ：

将视锥细胞和视杆细胞信号组合，提供完整的无色响应。

3. 亮度相关值 Q ：

结合无色和色彩响应来预测亮度感知，包括 **Helmholtz-Kohlrausch 效应**。

4. 白度-黑度 Q_{WB} ：

表示适应亮度变化如何影响白色和黑色物体的感知。

这些计算步骤使得 Hunt 模型能够在不同亮度水平和视觉条件下精确预测亮度和明度感知。

12.8 明度

在 Hunt 色貌模型中，明度是测试刺激亮度相对于参考白亮度的度量。明度的相关值 J 可以通过方程 (12.49) 进行计算：

$$J = 100 \left(\frac{Q}{Q_W} \right)^z \quad (12.49)$$

解释

在方程 (12.49) 中：

- J ：明度的相关值。
- Q ：测试刺激的亮度（由方程 12.45 计算）。
- Q_W ：参考白的亮度。
- z ：指数，用于模拟背景相对亮度对明度感知的影响。

这种明度的定义遵循 CIE 的标准，即明度是测试刺激亮度相对于白色亮度的比值。这个比值通过指数 z 进行调整，以反映背景亮度对明度的影响。

指数 z

指数 z 通过方程 (12.50) 计算，它描述了背景相对亮度对感知明度的影响：

$$z = \left(\frac{1 + Y_b}{Y_W} \right)^{1/2} \quad (12.50)$$

在方程 (12.50) 中：

- Y_b ：背景的相对亮度。
- Y_W ：参考白的相对亮度。

现象解释

1. 背景亮度的影响：

当背景变亮时，指数 z 增加。这意味着在亮背景上，暗的测试刺激会显得更暗，这种现象称为**同时明度对比**（Simultaneous Lightness Contrast）。

2. 明度感知：

明度 J 的计算反映了测试刺激的亮度如何随着背景亮度变化而变化。这种计算方法使得 Hunt 模型能够准确预测在不同背景条件下的明度感知。

计算步骤总结

1. 计算测试刺激亮度 Q ：

使用方程 (12.45) 计算测试刺激的亮度。

2. 计算参考白亮度 Q_W ：

对参考白进行相同的模型计算，得到 Q_W 。

3. 计算指数 z ：

根据背景相对亮度 Y_b 和参考白相对亮度 Y_W ，使用方程 (12.50) 计算指数 z 。

4. 计算明度 J ：

使用方程 (12.49)，通过亮度比值的幂运算得到明度 J 。

这种方法确保了 Hunt 模型能够在各种视觉环境下精确地预测明度感知，特别是在背景亮度变化引起的同时明度对比现象中。

12.9 色度

在 Hunt 色貌模型中，色度的相关值 C_{94} 是通过饱和度 s 和相对亮度（约等于明度）来确定的。这一定义遵循第 4 章中所述的一般定义，即彩度可以表示为饱和度乘以明度。彩度的精确计算公式如方程 (12.51) 所示：

$$C_{94} = s \left(\frac{Q}{Q_W} \right) \left[\left(\frac{Y_b}{Y_W} \right)^{0.69} \left(\frac{Q}{Q_W} \right)^{2.44} - 1.64 \left(\frac{Y_b}{Y_W} \right)^{0.29} \right] \quad (12.51)$$

方程 (12.51) 参数说明

- C_{94} : 色度的相关值。
- s : 饱和度，由方程 (12.39) 计算。
- Q : 测试刺激的亮度，由方程 (12.45) 计算。
- Q_W : 参考白的亮度。
- Y_b : 背景的相对亮度。
- Y_W : 参考白的相对亮度。

公式解释

1. 彩度与饱和度的关系：

彩度 C_{94} 是饱和度 s 与相对亮度 Q/Q_W 的乘积。这表示彩度不仅取决于色彩的纯度，还取决于刺激的亮度。

2. 背景亮度的影响：

方程 (12.51) 中的 $\left(\frac{Y_b}{Y_W} \right)^{0.69}$ 和 $\left(\frac{Y_b}{Y_W} \right)^{0.29}$ 反映了背景亮度对彩度的影响。当背景亮度增加时，彩度的感知会发生变化。

3. 相对亮度的非线性效应：

$\left(\frac{Q}{Q_W} \right)^{2.44}$ 和 $1.64 \left(\frac{Y_b}{Y_W} \right)^{0.29}$ 是经验确定的非线性项，用于更准确地建模亮度和背景亮度对彩度的影响。

经验基础

方程 (12.51) 是基于一系列色貌缩放实验的结果导出的 (Hunt, 1994; Hunt 和 Luo, 1994)。这些实验验证了彩度不仅依赖于饱和度, 还受到亮度和背景亮度的显著影响。

计算步骤总结

1. 计算饱和度 s :

使用方程 (12.39) 计算测试刺激的饱和度。

2. 计算亮度 Q 和 Q_W :

使用方程 (12.45) 计算测试刺激和参考白的亮度。

3. 确定背景亮度 Y_b 和 Y_W :

确定背景的相对亮度和参考白的相对亮度。

4. 代入方程 (12.51):

将以上参数代入方程 (12.51), 得到彩度 C_{94} 。

12.10 彩度

在 Hunt 色貌模型中, 鲜艳度的相关值 M_{94} 是通过彩度 C_{94} 和亮度水平 (或者说光度水平) 来确定的。鲜艳度表示颜色的强度和视觉冲击力, 受到亮度水平的影响。具体计算方法如方程 (12.52) 所示:

$$M_{94} = C_{94} F_L^{0.15} \quad (12.52)$$

参数说明

- M_{94} : 鲜艳度的相关值。
- C_{94} : 彩度的相关值, 由方程 (12.51) 计算。
- F_L : 亮度水平适应因子, 由方程 (12.9) 计算。

解释

1. 彩度 C_{94} :

彩度反映了颜色的纯度和强度, 已经考虑了饱和度和相对亮度。

2. 亮度适应因子 F_L :

亮度适应因子 F_L 描述了视觉系统对不同亮度水平的适应行为。将 F_L 提到 0.15 次方，可以适当调整亮度对鲜艳度的影响。

3. 鲜艳度 M_{94} :

鲜艳度 M_{94} 是彩度 C_{94} 和亮度适应因子 $F_L^{0.15}$ 的乘积，反映了在不同亮度水平下颜色的感知强度。随着亮度水平的增加，鲜艳度会相应增加。

经验基础

方程 (12.52) 是通过对视觉缩放实验数据的分析得出的 (Hunt, 1994)。实验结果表明，鲜艳度不仅依赖于彩度，还受到亮度水平的显著影响。

计算步骤总结

1. 计算彩度 C_{94} :

使用方程 (12.51) 计算彩度的相关值。

2. 计算亮度适应因子 F_L :

使用方程 (12.9) 计算亮度水平适应因子 F_L 。

3. 代入方程 (12.52):

将 C_{94} 和 $F_L^{0.15}$ 代入方程 (12.52)，得到鲜艳度 M_{94} 。

结论

鲜艳度 M_{94} 是一个综合指标，结合了彩度和亮度水平，能够准确反映颜色的视觉冲击力。Hunt 模型通过这种方法有效地模拟了在不同亮度水平下色貌的变化，为颜色感知提供了全面的预测工具。

12.11 逆向模型

由于 Hunt 色貌模型的复杂性，它无法进行解析反转 (analytical inversion)。在许多实际应用中，尤其是图像复制领域，需要色貌模型能够在正向和逆向两个方向上使用。因此，无法解析反转给 Hunt 模型的应用带来了困难，尤其是在只有明度、彩度和色相的情况下，这种困难尤为明显。

Hunt (1995) 提出的解决方法

Hunt (1995) 提出了一些应对这一难题的建议:

1. 简化模型

2. 忽略视杆细胞响应：

如果在模型中不考虑视杆细胞响应，可以简化反转过程。视杆细胞响应的引入是导致无法解析反转的原因之一。忽略视杆细胞响应会略微改变模型的预测结果，但在许多应用中，这种差异可以忽略不计。

- **适用条件：**当参考白的亮度高于 10 cd/m^2 时，可以使用这种方法。大多数对颜色复制进行精确判断的场景，其亮度水平都高于 10 cd/m^2 。

3. 逐次逼近法

4. 对于无法简化的情况，可以使用**逐次逼近法**（successive approximation）。

5. 这种方法通过迭代计算，直到获得与初始外观相关值相匹配的三刺激值。

6. 例如，可以使用 **Newton-Raphson 优化法** 进行迭代。

7. 构建查找表

8. 对于大数据集（如图像数据），逐次逼近法可能非常耗时。

9. 可以通过**正向和逆向模型**来构建三维查找表（lookup tables）。

10. 一旦生成了查找表，就可以使用插值技术快速转换图像数据。

11. 缺点：如果需要更改观测条件，需要重新计算查找表，这可能会导致显著的延迟。

模型实现步骤

在实施 Hunt 色貌模型时，可以将其分解为以下步骤。这些步骤同样适用于模型的正向和逆向实现：

1. 获取物理数据并确定其他参数。
2. 计算视锥细胞激发值 $\rho\gamma\beta$ 。
3. 计算相对视锥细胞激发值。
4. 计算亮度水平适应因子 F_L 。
5. 计算色适应因子 F_ρ 、 F_γ 、 F_β 。
6. 计算 **Helson-Judd 效应参数** r_D 、 g_D 、 b_D 。
7. 计算适应后的视锥细胞信号 ρ_a 、 γ_a 、 β_a 。
8. 计算无色信号 A_a 和色彩差异信号 C_1 、 C_2 、 C_3 。
9. 计算色相角度 h_s 。
10. 计算色相四分值 H 。
11. 计算色相组成 HC 。
12. 计算偏心因子 e_s 。

13. 计算低亮度三色盲因子 F_t 。
14. 计算色彩响应 M 和饱和度 s 。
15. 计算视杆细胞亮度适应因子 F_{LS} 。
16. 计算视杆细胞响应 A_S 。
17. 计算完整的无色响应 A 。
18. 计算亮度 Q 。
19. 计算明度 J 。
20. 计算彩度 C_{94} 。
21. 计算鲜艳度 M_{94} 。
22. 计算白度-黑度 Q_{WB} 。

提高计算效率的技术

1. 预计算常数：

2. 在预计算步骤中，首先计算所有与特定观测条件相关的常数，例如适应因子和参考白的相关值。
3. 这些预计算的数据可以在后续的计算中重复使用，而无需每次重新计算。

4. 减少冗余计算：

5. 在某些方程（如无色响应 A 的方程 12.44）中，包含了对常数的操作。可以将这些常数的操作合并为一个单一数值。
6. 例如，表达式 $-1 - 0.3 + (12 + 0.32)^{1/2}$ 可以简化为 **1.044**。

结论

Hunt 色貌模型是传统色貌模型中最复杂的一个。通过合理的简化和优化技术，例如忽略视杆细胞响应、使用逐次逼近法或构建查找表，可以在一定程度上克服其反向计算的困难。这些技术有助于提高模型的计算效率，特别是在处理大量图像数据时。

12.12 预测的视觉现象

正如前述，**Hunt 色貌模型**是目前最全面、最完整的色貌模型。它具有以下特性：

1. 适用多种背景和环境：

该模型能够预测在不同背景和环境下刺激的外观，其适用的亮度范围从人类视觉的绝对阈值到视锥细胞漂白的高亮度水平。

2. 适用于相关和非相关刺激：

Hunt 模型可用于相关色刺激和非相关色刺激。关于模型如何应用于非相关色的详细说明，见 Hunt (1991b)。

3. 预测多种色貌现象：

Hunt 模型可以预测一系列色貌现象，包括：

4. Bezold-Brücke 色相偏移

5. Abney 效应

6. Helmholtz-Kohlrausch 效应

7. Hunt 效应

8. 同时对比

9. Helson-Judd 效应

10. Stevens 效应

11. Bartleson-Breneman 观察结果

12. 光和色适应的影响：

该模型能够预测光适应和色适应引起的色貌变化，包括消光 (discounting-the-illuminant)。

13. 视杆细胞的贡献：

Hunt 模型独特地将视杆细胞的贡献纳入考虑，能够模拟在低亮度水平下的颜色感知。

复杂性与应用

尽管 Hunt 模型可以预测广泛的色貌现象，但这也带来了较高的复杂性。视觉系统本身非常复杂，因此对模型复杂性的接受无需道歉。然而，这种复杂性可能会使模型在某些应用中难以使用。

示例计算

表 12.3 给出了使用 Hunt 色貌模型对四个样本进行的示例计算。这些计算假设临近场和背景都是无色的（与光源色度相同），亮度因子为 20%，参考白也与光源色度相同，亮度因子为 100%。视杆细胞输入使用本章描述的近似方程进行计算，Helson-Judd 参数均设为 0.0。

表 12.3: Hunt 色貌模型示例计算结果

量值	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
X	19.01	57.06	3.53	19.01
Y	20.00	43.06	6.56	20.00
Z	21.78	31.96	2.14	21.78
XW	95.05	95.05	109.85	109.85
YW	100.00	100.00	100.00	100.00
ZW	108.88	108.88	35.58	35.58
LA	318.31	31.83	318.31	31.83
Nc	1.0	1.0	1.0	1.0
Nb	75	75	75	75
Discounting	Y	Y	Y	Y
h_s	269.3	18.6	178.3	262.8
H	317.2	398.8	222.2	313.4
HC	83B 17R	99R 1B	78G 22B	87B 13R
s	0.03	153.36	245.40	209.29
Q	31.92	31.22	18.90	22.15
J	42.12	66.76	19.56	40.27
C94	0.16	63.89	74.58	73.84
M94	0.16	58.28	76.33	67.3

结论

- **广泛的预测能力：** Hunt 模型能够预测多种色貌现象，使其成为颜色科学和视觉研究的重要工具。
- **复杂性权衡：** 尽管模型复杂，但可以通过预计算和简化方法提高效率。
- **适用场景：** 在亮度水平高于 10 cd/m^2 的大多数实际应用中， Hunt 模型可以提供准确的色貌预测。

这种全面性使得 Hunt 模型在图像复制、颜色校正和视觉感知研究中具有重要的应用价值。

12.13 为什么不要仅使用 Hunt 模型？

尽管 **Hunt 色貌模型** 看起来几乎可以满足任何色貌预测的需求，但它并没有被采纳为所有应用的唯一标准色貌模型。这主要是因为 Hunt 模型的**全面性带来了极高的复杂性**。

Hunt 模型的优势

- **极高的灵活性：**
Hunt 模型可以适应多种视觉实验和观测条件，具有很强的灵活性。该模型能够对各种色貌现象做出准确预测（如第 15 章将进一步探讨）。
- **广泛的预测能力：**
Hunt 模型可以预测从**低亮度阈值到视锥细胞漂白**等各种视觉现象。它能够处理相关和非相关色刺激，并考虑了视杆细胞的贡献。

Hunt 模型的局限性

- **复杂性高：**
Hunt 模型的全面性带来了实现和应用上的极大困难。在实际应用中，模型的复杂性使其难以实施，甚至有时完全无法操作。
- **参数选择困难：**
Hunt 模型的灵活性需要根据具体的视觉数据来调整参数。在获得视觉数据之前，很难确定合适的参数值。
在某些情况下，需要对参数进行优化而不仅仅是选择。如果没有足够的资源来优化参数，模型性能可能非常差。
- **默认参数的局限：**
如果只能使用推荐的默认参数， Hunt 模型在某些应用中的表现可能不如简单模型。因为默认参

数并非针对特定应用场景进行优化，预测结果可能出现偏差。

- **无法轻松反转：**

Hunt 模型不能被**解析反转** (analytical inversion)，这使得它在需要正向和逆向转换的应用中难以使用。

尽管可以使用逐次逼近法 (如 Newton-Raphson 优化法)，但这种方法在处理大数据集时非常耗时。

- **计算量大：**

Hunt 模型的计算开销非常高，难以快速处理大量数据，例如图像处理中的每个像素点。

需要预计算和查找表等技术来提高效率，但这些方法仍然存在局限性。

- **需要专业知识：**

使用 Hunt 模型需要用户具备较高的专业知识，才能正确地设置参数和理解结果。

对于缺乏颜色科学背景的用户来说，模型的学习和使用难度较大。

- **负三刺激值问题：**

Hunt 模型中用于预测由于环境亮度变化引起的对比变化的加性偏移函数，可能会导致预测的对应颜色出现**负三刺激值**。这种情况在某些特定的环境变化下会出现，影响了模型的适用性。

结论

Hunt 色貌模型在灵活性和预测能力方面表现出色，但由于其复杂性、计算成本高和参数依赖性强，使得它在许多实际应用中不够实用。除非可以对模型参数进行优化，否则在某些应用中，**简单的色貌模型**可能比 Hunt 模型更有效。

因此，在选择色貌模型时，需要根据**具体应用场景和可用资源**来权衡复杂性与实用性。对于需要高精度预测且有足够资源的场景，Hunt 模型是一个强大的工具；而对于实时应用或大数据处理，简单模型可能是更好的选择。