

信号与信息处理
技术丛书

半色调加网与 信息隐藏技术

曹鹏 刘喆灿 衣旭梅 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

013069554

TS805.4
04

信号与信息处理技术丛书

半色调加网与信息隐藏技术

曹 鹏 刘喆灿 衣旭梅 编著



北航

C1676875

TS805.4
04

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书共分5章,内容包括色彩学概述、印刷品质量评价与检测、半色调加网基本原理、典型加网算法及应用实例,以及基于半色调网点(形状、位置)调制的信息隐藏技术等。本书对半色调加网及在信息隐藏方面的最新研究进行了较为系统、深入的介绍,对于全面了解印前图文信息处理技术,以及半色调加网前沿技术具有重要作用。

本书可供从事印前图文信息处理、印刷防伪的工程技术人员及从事半色调信息隐藏技术的科研人员参考,也可作为相关专业本科及研究生参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

半色调加网与信息隐藏技术 / 曹鹏, 刘喆灿, 衣旭梅编著. —北京: 电子工业出版社, 2013.8
ISBN 978-7-121-20393-0

I. ①半… II. ①曹… ②刘… ③衣… III. ①数字印刷—色调 IV. ①TS805.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 099742 号

责任编辑: 董亚峰 特约编辑: 王 纲

印 刷: 北京季蜂印刷有限公司

装 订: 北京季蜂印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 720×1 000 1/16 印张: 13.75 字数: 198 千字

印 次: 2013 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前言

半色调加网是印前图文信息处理中的关键和核心技术。该技术利用了人眼视觉识别的局限性，通过改变半色调网点的性状、大小、布局、遮盖率等因素解决了原始连续调图像再现问题。

半色调加网自 19 世纪 90 年代发明以来，对印刷产业的发展发挥了巨大作用，目前技术已经成熟。但随着信息技术的迅猛发展和印刷工艺的不断进步，半色调加网技术出现了一些新的应用。本书主要针对现有印刷品防伪技术存在成本较高的问题，综合应用半色调网点加网、数字版权保护、信息隐藏、高精度信号采集、信息编码和解码技术，通过利用防伪信息（图形、图像、文字、印刷监管信息）二次调制半色调网点的位置和形状，实现防伪印刷和信息隐藏。

本书的主要研究工作受到北京市自然科学基金重点项目（B 类）（KZ201010015013）和国家自然科学基金面上项目（61170259）的资助。

本书在撰写过程中受到我国印刷设备领域著名专家、北京印刷学院谢普南教授的精心指导。但由于基于半色调网点的信息隐藏技术目前仍处于探索和完善过程中，本书尽管做了一些探索性研究工作，但其中必然存在不足之处，请广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 色彩	1
1.1.1 比色法及其 CIE 色刺激规范	1
1.1.2 同色异谱	7
1.1.3 色域	8
1.1.4 感知空间的统一	9
1.2 彩色图像的合成	11
1.2.1 色彩复制	11
1.2.2 分色	13
1.2.3 复制工艺	16
1.2.4 黑色	19
1.2.5 高保真彩色印刷	22
1.3 视觉模型	23
1.3.1 Weber-Fecher 定律	24
1.3.2 色彩差异	25
1.3.3 对比灵敏度与方位灵敏度	27
1.3.4 对比灵敏度函数公式	29

1.3.5	视觉模型	31
1.3.6	彩色视觉模型及 S-CIELAB	32
1.3.7	视觉模型的应用	35
第 2 章	印刷品质量评价与检测	43
2.1	质量评价	44
2.1.1	不同角度的评价	44
2.1.2	印刷品评价的内容	46
2.1.3	评价方法	49
2.2	质量检测	53
2.2.1	密度测量方法	53
2.2.2	密度计测量误差	57
2.2.3	色度测量方法	60
2.2.4	分光光度计测量法	62
2.3	质量控制	65
2.3.1	设计与制版	65
2.3.2	纸张	66
2.3.3	油墨	67
2.3.4	润版液的控制	69
2.3.5	橡皮布的控制	71
2.3.6	印刷过程色序的控制	75
2.3.7	车间环境温湿度控制及工艺操作的稳定控制	79
2.3.8	胶印中的水墨平衡	79
2.3.9	测控条在印刷上的应用	80
2.3.10	胶印印刷标准	82
第 3 章	半色调加网	85
3.1	传统阶调值的控制	86
3.1.1	阶调值的控制	86

3.1.2	照相加网工艺	88
3.1.3	投影加网	89
3.1.4	接触网屏	91
3.1.5	网点阶调值	92
3.2	加网	93
3.2.1	网点	93
3.2.2	网角	102
3.2.3	加网线数	104
3.2.4	网点测量与计算	105
3.2.5	网目调特征	106
3.3	加网处理	107
3.3.1	概述	107
3.3.2	调幅加网	109
3.3.3	调频加网	111
3.3.4	混合加网	112
3.3.5	扩频加网	115
3.4	加网质量要求	116
3.4.1	输入/输出分辨率	117
3.4.2	可传递的分辨率	122
3.4.3	网点形状	123
3.4.4	阶调值的影响	124
3.4.5	图像效果与补偿	126
第4章	典型加网算法及加网实例	128
4.1	数字加网	128
4.1.1	有理正切加网	129
4.1.2	超细胞加网	131
4.1.3	无理正切加网	133
4.1.4	加网输出	134

4.2 典型的(调频)加网实例	139
4.2.1 爱克发 CristalRaster	139
4.2.2 其他调频加网算法	142
4.3 龟纹	146
4.3.1 龟纹的产生原因	146
4.3.2 龟纹产生的机理及分布规律	147
4.3.3 龟纹的消除	154
4.3.4 龟纹防伪	156
4.4 网点变形及补偿措施	158
4.4.1 网点扩大	158
4.4.2 网点扩大及补偿措施	159
4.4.3 网点扩大的修正	164
第5章 半色调信息隐藏	170
5.1 基于调幅加网的信息隐藏	170
5.2 基于调频加网的信息隐藏	180
5.2.1 随机数和伪随机数	181
5.2.2 基于调频加网信息隐藏实例	183
5.3 基于网点形状不变位置随机变的信息隐藏及实例	186
5.4 其他方式的信息隐藏	188
5.4.1 最低有效位(LSB)信息隐藏	188
5.4.2 小波域信息隐藏算法	193
5.4.3 微结构加网防伪技术	195
5.5 信息隐藏的不可感知性	200
参考文献	206

第 1 章

概述

1.1 色彩

色彩是一种通过眼睛和大脑来传递感受的光学现象。由于色彩不是一个物理变量，因此它没有物理单位。一个物体从本质上说是不具有色彩的，但由于光的照射使其看上去具有了颜色。当呈现白色的日光照射到物体上时，由于部分光线的反射作用，例如反射可见频谱的红色部分，物体就呈现出红色。通常情况下，若一个物体对日光进行全反射，则其就会呈现为白色，反之，若吸收所有的可见光谱，则物体就呈现黑色。

当对色彩进行观察和描述时，通常都会受到物理上和生理上的影响。物理上的影响因素是可测量的，生理上的影响因素却不能测量。为了对色彩进行测量，国际照明委员会（CIE）在 1931 年定义了标准色度观察者条件，制定了一些对色彩描述有特别重要意义的规范。

1.1.1 比色法及其 CIE 色刺激规范

比色法是对事物的颜色进行衡量和评价的方法，国际照明委员会（CIE）是比色法发展的推动者，这个国际组织通过一系列 CIE 出版物对比色法进

行了定义和说明。

人眼视觉色彩的感知性、光源和在色域中的光谱测量构成了比色法的基础。不同的成像设备利用了不同的色彩空间，最为熟悉的例子就是电视的 RGB 空间和打印机的 CMY（或 CMYK）空间，由这些装置产生的颜色是依据装置的特点而定的。为确保在不同的设备中有一个合适的色彩还原，就需要一个不依赖于设备的色彩空间来作为一个可靠的交换标准，如利用比色法来对所有颜色给出一个定量测量的 CIE 色彩空间。

CIE 比色规则的方法基于加法混色的颜色匹配规则，加色法的原则称为 Grassmann 混色定律：

- (1) 指定的混合色必须用三个独立的变量来说明；
- (2) 在加色混合中，具有相同颜色外观的色彩（不考虑其光谱的组成）能够刺激产生相同的结果；
- (3) 如果混合色的一部分发生了变化，混合色则相应地发生了变化。

第一条定律建立了所谓的“色觉”——所有色调都可以由三种不同的刺激混合色相匹配，在这种约束条件下，其他任何一种混合色都不能与这三个刺激色相匹配。

第二条定律意味着刺激不同的光谱辐射分布（分布谱光辉）可能会产生相同的颜色，这种不同的物理刺激引起相同的颜色匹配，这称为“不同光谱能量分布的同色光”。因为一个相同的色彩匹配可能由不同的混合物的部分组合而成，所以这一现象又称“同色异谱”。

第三条定律建立了混合色的刺激比例与相加性的度量。

相应地，比色法的定律如下。

对称律：如果色刺激值 A 与色刺激值 B 相匹配，则色刺激值 B 与色刺激值 A 相匹配。

交换律：如果 A 与 B 相匹配， B 与 C 相匹配，则 A 与 C 相匹配。

均衡律：如果 A 与 B 相匹配，则 αA 与 αB 相匹配，其中 α 为正因素。任何颜色的刺激功率谱增加或减少，而其相对光谱分布保持不变。

相加律：如果 A 与 B 相匹配， C 与 D 相匹配，并且 $(A+C)$ 与 $(B+D)$

相匹配, 则 $(A+D)$ 与 $(B+C)$ 相匹配。其中 $(A+C)$ 、 $(B+D)$ 、 $(A+D)$ 和 $(B+C)$ 分别表示 A 与 C 相加混合、 B 与 D 相加混合、 A 与 D 相加混合, 及 B 与 D 相加混合。

CIE 三色刺激规范或 CIE XYZ 是建立在使用对象的频谱信息、光源和色彩匹配函数上的 Grassmann 定律。它是一个在视觉上的不均匀的色彩空间。在数学上, CIE XYZ 是所有三个光谱的产物的可见区的积分:

$$\begin{aligned} X &= k \int P(\lambda) I(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \cong k \sum P(\lambda) I(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y &= k \int P(\lambda) I(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \cong k \sum P(\lambda) I(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z &= k \int P(\lambda) I(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \cong k \sum P(\lambda) I(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \\ k &= \frac{100}{\sum I(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda} \end{aligned} \quad (1-1)$$

X, Y, Z 是物体的色刺激值, λ 是波长。在实践中, 积分可近似为有限步骤的累加, 通常在 10nm 的间隔内。被测物的频谱 $P(\lambda)$ 是由颜色匹配函数 $[\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)]$ 与一个标准光源 $I(\lambda)$ 加权得到的, 所得频谱是结合所有可见区相来给出相对应 X, Y 或 Z 的色刺激值。

色彩的三维属性由绘制在直角坐标系中的每个三色刺激的成分值所表示, 这个结果称为“三色刺激空间”。

三维三色刺激空间投影到二维平面上产生 X, Y 色度图, 如图 1-1 所示。其用数学可表示为

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X+Y+Z} \\ y &= \frac{Y}{X+Y+Z} \\ z &= \frac{Z}{X+Y+Z} \\ x+y+z &= 1 \end{aligned} \quad (1-2)$$

其中, x, y, z 为色度坐标, 它们是三色刺激值的标准化。由于三个色度坐标的和为 1, 因此色度规范只需要确定两个色度坐标 x 和 y , 颜色轨迹

的边界是色彩匹配函数（光谱色）的平面线图，色度坐标代表了为得到任何颜色的三个刺激 X , Y 和 Z 的相对量。然而它们没有表明所得颜色的亮度，亮度包含在 Y 值中。因此，描述一个完整的颜色是由三个元素 (x, y, Y) 决定的。

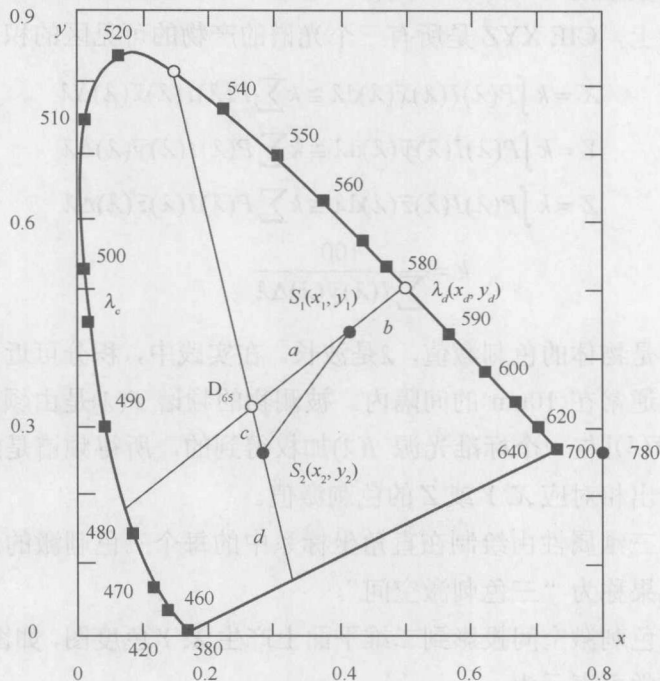


图 1-1 描述主波长和纯度的 CIE 色度图

色度图能提供十分有用的信息，如主要的波形、互补色和颜色的纯度。主波长是以一个原则为基础的，这个原则是：在一个色度图中，所有包含两个成分的混色的所有刺激都倾向于一条直线。因此，通过延长连接颜色和光源的光谱轨迹线就能得到一种颜色的主波长。举例来说，在图 1-1 中，颜色 S_1 的主波长为 584nm，由于一个光谱色的补色在该色与所用光源的连线处的另一侧，因此在光照 D_{65} 下的颜色 S_1 的补色为 483nm。一个颜色和它的补色以合适的比例添加到一起就能产生白色。如果为了得到主波长的

延长线与“紫色线”相交，即直线连接了两个极端光谱色（通常为 380nm 到 770nm），那么在可见光谱中就不会有主波长。在这种情况下，通过带有后缀“c”的互补谱色来指定主波长，通过向后延长光谱轨迹线得到数值。例如，在图 1-1 中，颜色 S_2 的主波长为 530nm。

纯色谱线就是表示饱和纯度为 100% 的光谱轨迹。光源则表示了纯度为 0% 的完全不饱和色。CIE 将给定中间色的纯度定义为两个距离的比值：一个距离为光源到颜色的距离，另一个为从光源经过颜色到光谱轨迹或紫色线的距离。在图 1-1 中，颜色 S_1 的纯度表示为 $a/(a+b)$ ，颜色 S_2 的纯度为 $c/(c+d)$ 。

两色或多色的混合色的 CIE 色度坐标也遵循 Grassmann 定律。

说明 CIE 彩色规则除需要一个物体的频谱之外，还需要色彩匹配函数和光源的频谱。色彩匹配函数也称 CIE 标准观察组，是为了代表一个具有正常色觉的普通观察者，它们是由实验所决定的，实验包括了测试光只对物体的一半进行照射。一个观察者试图通过在另一半物体上调整三个相加原色 $\bar{r}$ 、 $\bar{g}$ 和 $\bar{b}$ 来感知匹配（色度、饱和度与亮度）测试光（图 1-2）。

数学上可表示为

$$\Omega = \bar{r}R + \bar{g}G + \bar{b}B \quad (1-3)$$

Ω 代表了测试光的颜色， R 、 G 、 B 相当于红色匹配光、绿色匹配光、蓝色匹配光， $\bar{r}$ 、 $\bar{g}$ 和 $\bar{b}$ 是相关光的相对量。通过这种排列，一些颜色（如在蓝绿色区域）就不能与所加的三原色相匹配。这个问题可以通过在测试光旁边加入一个原色光来解决。例如，对测试光加入红色去匹配一个蓝绿色：

$$\Omega + \bar{r}R = \bar{g}G + \bar{b}B \quad (1-4)$$

数学上，对测试光加入红色与从另两个原色中减去红色相对应：

$$\Omega = -\bar{r}R + \bar{g}G + \bar{b}B \quad (1-5)$$

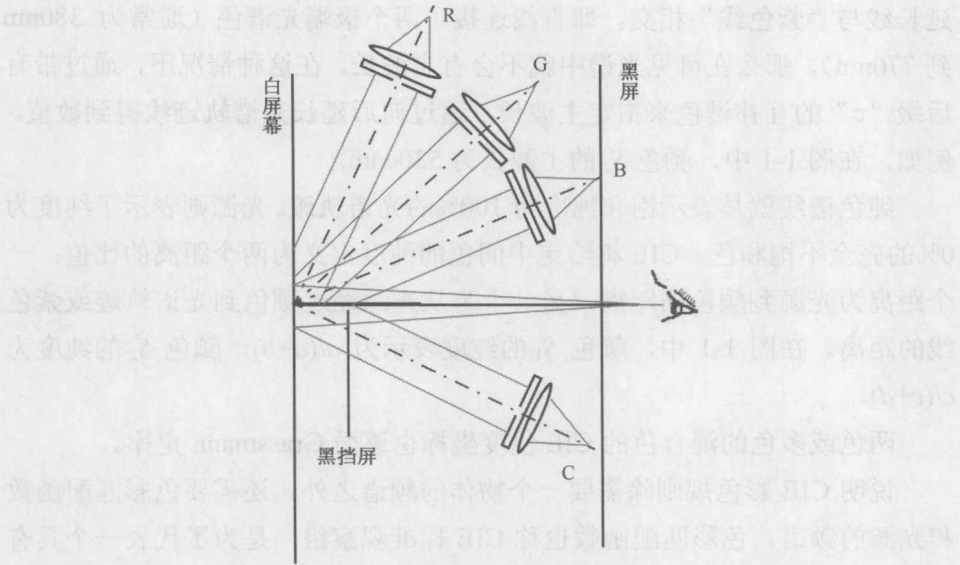


图 1-2 色彩匹配实验

图 1-3 描绘了 $\bar{r}$ 、 $\bar{g}$ 和 $\bar{b}$ 的光谱，可看到在曲线的一些部分显示为负值。

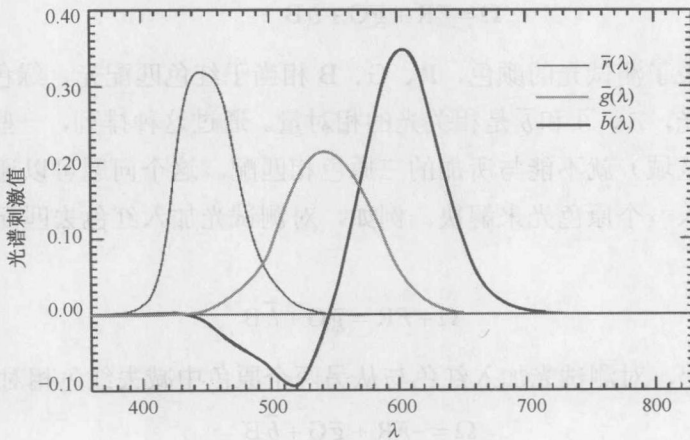


图 1-3 CIE 光谱刺激值 ($\bar{r}$ 、 $\bar{g}$ 和 $\bar{b}$ 的光谱)

CIE 建议了两个标准观察组：CIE 1931 2° 观察者和 CIE 1964 10° 观察者。

CIE 1931 2° 的 $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 是利用在波长为 700.0nm、546.1nm 和 435.8nm 处的光谱匹配刺激 R、G、B 的光谱三色刺激值 $\bar{r}(\lambda)$ 、 $\bar{g}(\lambda)$ 、 $\bar{b}(\lambda)$ 得到的。CIE 1964 10° 的 $\bar{x}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{y}_{10}(\lambda)$ 、 $\bar{z}_{10}(\lambda)$ 是由光谱三色刺激值关于匹配刺激 R_{10} 、 G_{10} 、 B_{10} 得到的。它们所依据的波数为 15500cm^{-1} 、 19000cm^{-1} 和 22500cm^{-1} ，大约与 645.2nm、536.3nm 和 444.4nm 的波长相对应。

CIE 标准光源是另一个 CIE 色彩规范系数，并且具有多种标准光源，如光源 A、B、C、D。光源 A 是在色温为 2856K 环境下工作的一个气体填充钨丝灯。光源 B 和 C 是通过将它们与在光室中由化学溶液制成的一个滤镜相连接而得到的，并且来源于 A。光源 B 和 C 可以由不同的化学溶液得到。光源 A 依据 Planck 的辐射定律所计算得到。

$$P_e(\lambda, T) = c_1 \lambda^{-5} [\exp(c_2 / \lambda T) - 1]^{-1} \text{Wm}^{-3} \quad (1-6)$$

其中， $c_1 = 3.7415 \times 10^{-16} \text{Wm}^2$ ， $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{mK}$ 。

为使温度 T 与光源 A 相匹配，设定 T 为 2856K。

光源 D 在数学上是模仿各阶段的自然光，这些光源基于来自太阳和天空的各种不同辐射的组合。对这些组合的许多测量分析表明，在自然光下，日光的相对色温与它的相对的光谱能量分布之间有着一个简单的关系。因此，光源 D 被设定为开尔文色温乘以 100，例如 D_{50} 是光源在 5003K 下得到的。使用最频繁的光源为 D_{50} ，它在印刷工艺行业被作为标准观察光源， D_{65} 是在日光下进行比色法的首选光源。

1.1.2 同色异谱

Grassmann 的第二定律表明了两个光源或两个刺激在颜色外观不同甚至是它们的光谱辐射分布不同的情况下仍可能会相匹配。条件等色通常可以用如下等式表示：

$$\begin{aligned} \int \phi_1(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda &= \int \phi_2(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ \int \phi_1(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda &= \int \phi_2(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ \int \phi_1(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda &= \int \phi_2(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (1-7)$$

其中, $\phi_1(\lambda)$ 、 $\phi_2(\lambda)$ 为两个不同的色刺激函数。它们可以在许多方面都有不同。例如, 它们可以是不同的光源:

$$\phi_1(\lambda) = I_1(\lambda), \quad \phi_2(\lambda) = I_2(\lambda) \quad (1-8)$$

这种情况可能会发生在两个光照具有相同的色度, 但其中一个是全辐射而另一个是高度选择性辐射的时候。当两个光源为同色异谱时, 在观察者之间观察它们时, 它们会表现出具有相同的颜色。但当两个同色异谱的光照被用来照明一个光谱选择性对象时, 该对象就不一定会有相同的颜色外观。

另一个可能的情况是它们表示不同的对象被相同光源照射:

$$\phi_1(\lambda) = P_1(\lambda)I(\lambda), \quad \phi_2(\lambda) = P_2(\lambda)I(\lambda) \quad (1-9)$$

在这种情况下, 具有不同光谱能量分布的同色光给出了相同的(或非常接近的)色度测量值, 但是若利用一个不同的光源进行照射则会显得不同。

最复杂的情况是不同的光源照射不同的对象:

$$\phi_1(\lambda) = P_1(\lambda)I_1(\lambda), \quad \phi_2(\lambda) = P_2(\lambda)I_2(\lambda) \quad (1-10)$$

通常情况下, 同色异谱的匹配对观察者或一个光源是特定的。当观察者或光源改变时, 同色异谱便不再匹配。在一些情况下若有第二个光源进行照射, 同色异谱依旧能够匹配。通常, 在三个或更多的波长中若有两个样本的反射率相等时该情况成立。这些样本在同一光源下会趋于同色异谱, 如果波长的相交点位置合适, 那么它们可能会为第二个光源提供同色异谱匹配。

1.1.3 色域

图 1-1 所示的色度图表展示了一个二维图表中的色域边界。由于亮度轴没有给出, 所以这个边界只是一个投影的色域。这个色度图的马蹄状是

一个由纯度最高颜色的光谱色形成的理想色域，而在实际中，这些颜色是不能够获得的。实际的色彩设备有着更小的色域。图 1-4 表明了一个典型显示器、打印机和胶片在一个色度图表中的色域。色域的大部分是由显示器和打印机重叠而成的；但是也有一些区域显示器可以呈现而打印机却不能着色，反之亦然。这就给图像复制提出了一个问题，需要一些不同种类的色域绘图来解决实际问题。

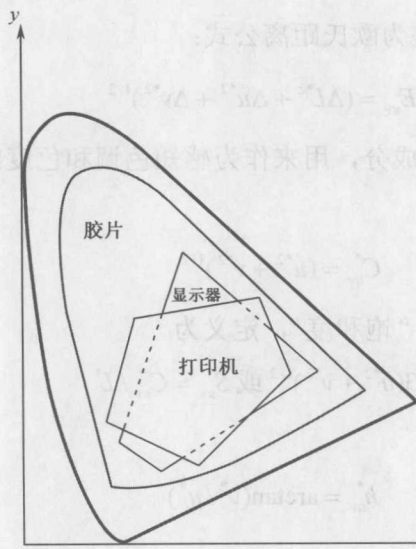


图 1-4 显示器、打印机和胶片在一个色度图表中的色域

1.1.4 感知空间的统一

视觉色彩空间的统一源自 CIE XYZ 的非线性变换。CIE LUV 是 1967UCS 色度坐标 u' 、 v' 、 Y 的变换：

若 $Y/Y_n \geq 0.008856$ ，则

$$L^* = 116(Y/Y_n)^{1/3} - 16$$