

北京理工大学“双一流”建设精品出版工程

# Advanced Colorimetry

# 高等色度学

廖宁放 石俊生 贺书芳 程灏波 冯云鹏 陈载清◎编著

色度学 (colorimetry) 是一门研究人类视觉系统对颜色现象的主观感知规律及其客观计量方法的科学。传统色度学以 CIE1931XYZ 标准色度系统为基础, 逐步发展了一系列的色度空间、色差公式、相关测量标准等, 且大多沿用至今。然而, 伴随着颜色测量及颜色再现的数字化、图像化、跨媒介、立体化、智能化等发展趋势, 传统色度学的理论体系受到严重挑战, 由此逐步产生了以色貌模型 (color appearance model)、图像色貌模型 (image color appearance model) 等为代表的现代色度学理论体系, 这一体系可以归类为高级色度学或先进色度学 (advanced colorimetry) 的范畴, 这正是本书以“高等色度学”命名的由来。

与传统色度学相关教材或论著相比较, 高等色度学更侧重于介绍、论述颜色科学及其相关领域的先进理论、技术、方法等, 包括色貌模型、图像色貌模型、光谱成像及颜色再现、数字颜色管理系统、立体颜色视觉等。

本书在对色貌模型的发展过程以及各种色貌模型的特点进行概述的基础上, 重点介绍了 CIE 发布的 CIE CAM97s、CIE CAM02 以及在此基础上发展的 CAM16 色貌模型, 尤其对色貌模型研究所涉及观察条件、色貌属性、色貌现象、色适应变换等进行了较详细的描述。本书还对图貌模型 iCAM 涉及的人眼 CSF、色差模型 S-CIE LAB 以及 IPT 色空间等进行了介绍, 重点描述了 Fairchild 和 Johnson 提出的 iCAM, 特别对 iCAM 在图像色貌预测、图像色差预测、图像质量预测、色貌现象预测、高动态范围图像再现等做了详细介绍。

本书的另一主干内容是光谱成像理论与技术, 其中包括典型光谱成像系统的理论与技术、多光谱成像系统的光谱构建及颜色再现理论与技术等。它们都是现代颜色科学理论及其应用技术体系中不可或缺的内容, 因此成为本书的重要组成部分。

数字颜色管理系统是现代色度学理论与技术的应用典范, 其框架已逐渐成熟, 因此也成为本书的内容之一。

立体颜色视觉是颜色科学与技术领域的又一重要方向, 例如人工视觉、3D 显示、虚拟现实等都离不开立体颜色视觉基础理论的支撑。

本书由北京理工大学廖宁放教授、云南师范大学石俊生教授、中国计

量科学研究院贺书芳博士、北京理工大学程灏波教授、北京理工大学冯云鹏博士以及云南师范大学陈载清副教授共同编著完成。

全书由绪论和11章组成。其中，绪论由廖宁放和石俊生共同编写；第1章至第7章主要由石俊生编写，贺书芳参与了第1章和第3章的部分内容编写；第8章由廖宁放、程灏波以及冯云鹏共同编写；第9章、第10章由廖宁放编写；第11章主要由贺书芳编写，陈载清参与了其中部分内容的编写。全书由廖宁放统稿。

北京理工大学颜色科学与工程国家专业实验室的博士研究生李玉梅同学参加了本书的部分图表制作和文字校对工作。

本书可作为研究生教材或供其他相关人员参考。本书介绍的部分内容取材于较新的研究成果，某些理论尚不成熟，其中部分内容的描述加入了作者本人的观点，欢迎广大颜色科技工作者以及感兴趣的读者提出宝贵意见，以促进我国颜色科学与技术水平的提高。另外，书中大部分内容参考了英文资料，一些术语仍保留英语原文，以供读者参考。

作者

2019年8月20日

# 目 录

## CONTENTS

绪论 .....	001
第1章 颜色与视觉 .....	007
1.1 颜色与光源 .....	007
1.1.1 可见光 .....	007
1.1.2 光谱分布 .....	007
1.1.3 光度学基本概念 .....	009
1.2 物体特性描述 .....	010
1.2.1 光的吸收、反射与透射 .....	010
1.2.2 光谱透射率 .....	010
1.2.3 光谱反射率 .....	011
1.2.4 光的吸收 .....	011
1.3 视觉生理学基础 .....	012
1.3.1 人眼结构 .....	012
1.3.2 视网膜构成 .....	013
1.3.3 视觉知觉过程 .....	016
1.4 颜色视觉理论 .....	018
1.4.1 三色学说 .....	018
1.4.2 对立色学说 .....	020
1.4.3 阶段学说 .....	021
1.5 视觉现象 .....	023
1.5.1 明视觉与暗视觉 .....	023
1.5.2 视觉敏锐度 .....	023
1.5.3 色缺陷 .....	024
1.5.4 颜色表观特征 .....	024
1.6 小结 .....	026
思考题 .....	026

<b>第2章 CIE 标准色度系统</b> .....	027
2.1 颜色匹配与 CIE 1931 RGB .....	027
2.1.1 CIE 及其标准 .....	027
2.1.2 格拉斯曼定律 .....	028
2.1.3 颜色匹配实验 .....	029
2.1.4 CIE 1931 RGB .....	029
2.2 CIE 1931 XYZ .....	031
2.2.1 CIE 1931 光谱三刺激值 .....	031
2.2.2 CIE 1931 XYZ 色度计算 .....	031
2.2.3 CIE $Y_{xy}$ 色空间与色品图 .....	032
2.2.4 色品图用途 .....	033
2.2.5 CIE 1931 RGB 与 CIE 1931 XYZ 之间变换关系 .....	035
2.3 CIE 1964 补充标准色度系统 .....	036
2.4 光源和照明体 .....	036
2.4.1 标准光源与标准照明体 .....	036
2.4.2 光源参数 .....	038
2.5 色差公式与均匀色空间 .....	039
2.5.1 色差公式及其发展 .....	039
2.5.2 CIE $L^*u^*v^*$ 均匀色空间及色差公式 .....	041
2.5.3 CIE $L^*a^*b^*$ 均匀色空间及色差公式 .....	042
2.5.4 CMC( $l:c$ ) 色差公式 .....	043
2.5.5 CIE 94 色差公式 .....	044
2.5.6 CIE 2000 色差公式 .....	044
2.6 色空间的均匀性及色差公式表现 .....	045
2.6.1 CIE $Y_{xy}$ 颜色空间的不均匀性 .....	045
2.6.2 CIE 1960 和 CIE 1964 均匀色空间 .....	047
2.6.3 CIE 1976 均匀色空间 .....	048
2.6.4 CIE DE2000 .....	049
2.7 小结 .....	049
思考题 .....	050
<b>第3章 色貌属性与色貌现象</b> .....	051
3.1 色貌属性 .....	051
3.1.1 非相关色与相关色 .....	051
3.1.2 色貌绝对与相对属性 .....	052
3.1.3 光亮度 .....	054
3.2 色貌现象 .....	055
3.2.1 空间结构现象 .....	056
3.2.2 亮度现象 .....	059
3.2.3 色相现象 .....	063

3.2.4	Bartleson - Breneman 方程 .....	064
3.2.5	颜色恒常性与折扣光源 .....	065
3.3	视觉适应 .....	066
3.3.1	明适应 .....	066
3.3.2	暗适应 .....	067
3.3.3	色适应 .....	067
3.4	色貌现象和视觉适应的产生机理 .....	068
3.4.1	色貌现象的产生机理 .....	068
3.4.2	视觉适应的产生机理 .....	069
3.5	小结 .....	070
	思考题 .....	070
<b>第4章</b>	<b>色适应变换</b> .....	<b>071</b>
4.1	色适应相关概念 .....	071
4.1.1	对应色 .....	071
4.1.2	色适应机理 .....	071
4.1.3	色适应模型及色适应变换 .....	072
4.1.4	色适应变换架构 .....	073
4.2	色适应变换 .....	074
4.2.1	von Kries 模型 .....	074
4.2.2	Nayatani 模型 .....	076
4.2.3	Fairchild 模型 .....	078
4.2.4	Bradford 及锐变换 .....	079
4.2.5	CMCCAT2000 .....	080
4.2.6	CAT02 .....	082
4.3	色适应变换评价 .....	083
4.3.1	对应色数据 .....	083
4.3.2	评价实例一 .....	085
4.3.3	评价实例二 .....	088
4.4	小结 .....	089
	思考题 .....	090
<b>第5章</b>	<b>色貌模型</b> .....	<b>091</b>
5.1	色貌模型基础 .....	091
5.1.1	色貌模型定义 .....	091
5.1.2	观察条件 .....	092
5.1.3	色貌模型基本架构 .....	094
5.2	色貌模型简介 .....	096
5.2.1	最简单的色貌模型 CIE LAB .....	096
5.2.2	色貌模型发展历程 .....	098
5.3	CIE CAM97s .....	101

5.3.1	计算步骤	101
5.3.2	使用指导	106
5.3.3	CIE CAM97s 逆变换	109
5.3.4	CIE CAM97s 的不足	109
5.4	CIE CAM02 色貌模型	110
5.4.1	对 CIE CAM97s 的改进	110
5.4.2	计算步骤	110
5.4.3	CIE CAM02 使用说明与特点	116
5.4.4	CIE CAM02 逆向模型	120
5.5	色貌模型的测试与评价	121
5.5.1	色貌数据集	121
5.5.2	评价实例——CIE CAM02 与 CIE CAM97s 表现比较	121
5.6	ICC 中应用 CIE CAM02 指南	126
5.6.1	ICC 使用色貌模型流程	126
5.6.2	ICC 中使用 CIE CAM02 的目的	126
5.6.3	CIE CAM02 参数的确定	127
5.6.4	ICC PCS Lab 编码值与 CIE CAM02 值的变换	127
5.7	CIE CAM02 模型存在的主要问题	127
5.8	CIE CAM02 模型的改进	130
5.9	CAM16 色貌模型	133
5.10	小结	135
	思考题	136
<b>第 6 章</b>	<b>图像色貌模型</b>	<b>137</b>
6.1	图像色貌模型相关技术	137
6.1.1	图像方面的研究	137
6.1.2	人眼对比度敏感函数	138
6.1.3	S - CIE LAB 模型	139
6.1.4	IPT 均匀色空间	142
6.2	图像色貌模型	143
6.2.1	iCAM 架构	143
6.2.2	iCAM 处理步骤	145
6.3	iCAM 应用	148
6.3.1	iCAM 模块化结构概念	148
6.3.2	图像色貌预测	149
6.3.3	图像色差预测	149
6.3.4	图像质量预测	151
6.3.5	色貌现象预测	152
6.3.6	高动态范围图像再现	153
6.4	小结	155

思考题	156
<b>第7章 图像复制效果评价</b>	<b>157</b>
7.1 心理物理学简介	157
7.1.1 历史	157
7.1.2 阈值技术	159
7.1.3 量表技术	161
7.2 色貌及图像复制视觉实验方法	162
7.2.1 视觉心理物理学	162
7.2.2 观察与匹配技术	162
7.2.3 彩色成像应用中的量表技术	165
7.2.4 评价实例	168
7.3 小结	173
思考题	173
<b>第8章 颜色领域的光谱成像技术</b>	<b>174</b>
8.1 基色成像与光谱成像概述	174
8.1.1 标准 sRGB 颜色空间	174
8.1.2 基色成像系统	177
8.1.3 光谱成像系统	182
8.2 窄带光谱成像	185
8.3 宽带光谱成像	187
8.4 色散型光谱成像	187
8.5 傅里叶变换光谱成像	189
8.5.1 发展状况	189
8.5.2 工作原理	190
8.5.3 光谱立方体构建	192
8.6 快照式光谱成像	196
8.6.1 发展状况	197
8.6.2 滤色阵列快照式光谱成像系统	197
8.6.3 光谱构建方法	197
8.7 计算层析光谱成像	198
8.7.1 发展状况	198
8.7.2 CT 光谱成像工作原理	198
8.7.3 CT 投影重建基本算法	200
8.7.4 滤波或卷积反投影重建算法	201
8.8 压缩感知光谱成像	202
8.8.1 发展状况	203
8.8.2 压缩感知基本原理	204
8.8.3 信号重构算法	205
8.8.4 DMD 压缩感知光谱成像系统	209

8.9 编码孔径光谱成像 .....	212
8.9.1 发展状况 .....	212
8.9.2 编码孔径成像基本原理 .....	213
8.9.3 编码模板及数据立方体复原算法 .....	217
8.10 小结 .....	222
思考题 .....	222
<b>第9章 多光谱成像系统光谱构建</b> .....	<b>223</b>
9.1 多光谱成像系统的工作流程 .....	223
9.2 多光谱通道光谱灵敏度优化设计 .....	225
9.2.1 主成分分析法 .....	225
9.2.2 非负基函数分析法 .....	226
9.2.3 实验筛选法 .....	228
9.3 伪逆矩阵法光谱构建 .....	228
9.4 维纳估计法光谱构建 .....	229
9.5 人工神经网络法光谱构建 .....	230
9.6 多光谱成像的光谱构建精度评价 .....	231
9.6.1 单纯的光谱构建精度评价 .....	231
9.6.2 基于颜色再现的光谱构建精度评价 .....	232
9.7 小结 .....	233
思考题 .....	234
<b>第10章 数字颜色管理系统</b> .....	<b>235</b>
10.1 颜色管理系统框架 .....	235
10.1.1 CMS 组成结构 .....	235
10.1.2 颜色特性文件 .....	236
10.1.3 颜色特性文件链接空间 .....	236
10.1.4 颜色管理模块 .....	237
10.1.5 设备颜色特性化 .....	238
10.1.6 颜色管理工作流程 .....	238
10.2 颜色管理系统基本概念 .....	240
10.2.1 白场 .....	240
10.2.2 Gamma 特性曲线 .....	240
10.2.3 设备标定 .....	241
10.2.4 颜色变换 .....	242
10.2.5 色域映射 .....	242
10.2.6 显色意图 .....	243
10.2.7 色适应变换 .....	246
10.2.8 色貌模型变换 .....	249
10.2.9 LUT 变换模型 .....	249
10.2.10 TRC/Matrix 变换模型 .....	252

10.2.11 神经网络变换 .....	253
10.3 颜色特性文件构建 .....	254
10.3.1 输入设备 profile .....	254
10.3.2 显示设备 profile .....	255
10.3.3 输出设备 profile .....	255
10.4 ICC 颜色特性文件规范 .....	256
10.4.1 ICC profile 文件结构 .....	256
10.4.2 ICC profile 文件头编码 .....	257
10.4.3 ICC profile 文件类型 .....	258
10.5 小结 .....	260
思考题 .....	260
<b>第 11 章 立体颜色视觉</b> .....	<b>261</b>
11.1 立体视觉简介 .....	261
11.1.1 立体视觉原理 .....	261
11.1.2 立体视觉的认知机制 .....	263
11.1.3 立体视觉的实验方法 .....	264
11.2 颜色视觉和立体视觉的交互作用 .....	265
11.2.1 颜色信息对深度感知的影响 .....	266
11.2.2 深度信息对颜色感知的影响 .....	268
11.2.3 颜色信息对轮廓感知的影响 .....	270
11.3 立体显示的双目颜色融合 .....	271
11.3.1 立体显示原理 .....	271
11.3.2 双目颜色融合 .....	272
11.4 小结 .....	274
思考题 .....	274
附录 A CAM16 色貌模型 .....	275
附录 B 均匀色空间 CAM16 - UCS .....	281
<b>参考文献</b> .....	<b>282</b>

# 绪 论

色度学 (colorimetry) 是颜色科学与技术理论体系的重要组成部分, 它是自 20 世纪初发展起来的一门以视觉生理、视觉心理、物理光学、光电子学、电子计算技术等为基础的综合性学科, 在照明、摄影、电影、电视、印刷、染料、涂料、纺织、造纸、交通、化工、伪装、环境、工农业生产、人工视觉、文化艺术等行业及部门都有广泛的应用。

20 世纪末, 伴随着科学技术信息化的发展, 颜色科学相关理论与技术也进入了数字化、图像化、跨媒介、立体化、智能化、高动态范围的时代。现阶段各种数字化彩色媒体的出现, 使得颜色信息的应用愈发渗透到科技社会的各个领域。在众多的颜色技术应用场合, 人们对颜色信息处理及交流的标准化提出了更高的要求。与此相适应, 色度学的理论与技术已经得到广泛、深入的补充和发展。

## 1. 高等色度学的内涵

迄今为止, 色度学的发展可概括为三个阶段: 颜色表示 (color specification) 阶段、色差评估 (color difference evaluation) 阶段和颜色外观建模 (color appearance modelling) 阶段。其中第三个阶段以色貌模型 (color appearance model)、图像色貌模型 (image color appearance model)、跨媒体颜色再现等为研究对象, 并形成了一套完整的理论体系, 因此可以归类为高级或先进色度学 (advanced colorimetry) 的范畴, 这正是本书冠名为“高等色度学”的主要依据。

## 2. 色貌模型的产生

国际照明委员会 (Commission Internationale de l'Éclairage, CIE) 1931 年颜色匹配实验建立的三刺激值颜色度量理论, 成为目前颜色测量与色差评价的理论与应用基础, 是国际上沿用至今的标准。该标准定义了颜色知觉的三个基本元素: 光源、目标和观察者。CIE 标准色度系统的颜色匹配实验是在一种特定的简化观察条件下 (viewing condition) 进行的, 即 CIE 标准色度系统用于度量孤立、特定观察条件下的简单颜色刺激, 以及预测两个简单刺激的颜色匹配。通常把这种建立在标准光源、标准观察条件以及标准观察者条件下的颜色体系称作 CIE 标准色度系统, 也称为三刺激色度学 (CIE tristimulus colorimetry)、基本色度学 (basic colorimetry) 或传统色度学。

虽然以 1931 年颜色匹配实验建立的 CIE1931XYZ 色度系统奠定了颜色测量的基础, 但由于其色空间的不均匀性, 不能用于色差评价; 同时, 该系统也没有建立与视觉感知色貌属性之间的关联。CIE 在此基础上于 1976 年发布了 CIE LUV 以及类似的 CIE LAB 均匀色空间及相应的色差公式。CIE LAB 色空间不仅定义了色差公式, 同时也是第一个用物理量预测视觉感知量 (色貌属性明度、色相和彩度) 的模型, 即第一个色貌模型 (Color Appearance Model)。此外, 以 CIE LAB 均匀色空间及色差公式为基础, CIE 又先后发展了多个色差公式, 包括 1984 年发布的 CMC (1:c)、1987 年发布的 BFD (1:c)、1994 年发布的 CIE94 以及 2001 年

发布的 CIEDE2000。CIEDE2000 是目前最新的,且被认为是最好的色差公式。

进入 20 世纪 90 年代,随着图像技术以及各种彩色媒体设备的广泛使用,为满足不同媒体间颜色传递和数字视频等工业应用的需求,工业企业家迫切要求颜色科学家解决不同媒体在不同观察条件和环境下的颜色匹配及颜色再现问题。但是传统的 CIE 标准色度系统没有考虑观察条件发生变化时两种刺激是否匹配,因此无法描述不同媒体在不同观察条件下的刺激,也无法解释观察条件变化或复杂刺激引起的各种色貌现象。尽快找到一个解决不同观察条件下色貌计算与预测的模型就成为当时迫切需要解决的重大课题。

关于色貌模型,CIE 技术委员会 TC1-34 是这样定义的:色貌模型是任何一个至少包括对色貌属性的明度、彩度、色相的预测;对于一个能够合理预测这些属性的模型,至少包括一个色适应变换形式。如果需要预测绝对色貌属性视明度和视彩度、Hunt 和 Stevens 依赖于亮度的色貌现象、同时对比和勾边等空间结构色貌现象等,则色貌模型将更复杂<sup>[11]</sup>。总之,色貌模型就是要解决不同观察条件下颜色刺激的度量问题,即预测包括照明、背景、环境等复杂观察条件下人类视觉系统对颜色刺激的颜色知觉。

色貌模型不仅可以解决不同观察环境下颜色再现问题,解释各种色貌现象,如 Stevens 效应、Hunt 效应、Helson-Judd 效应、Helmholtz-Kohlrausch 效应、Bartleson-Breneman 方程、折扣光源等,还可以应用于光源的再现特性、色域映射等问题。一个理想的模型应该在颜色匹配、色差和色貌三个方面解决所有的问题。色貌模型不仅可以直接应用于跨媒体的图像颜色再现,解释各种颜色视觉现象、光源显色特性、设备色域映射等,而且在图像质量评价、色差评价等方向有潜在的应用。

与传统色度学相对应,有人将基于色貌模型的颜色理论体系称作现代色度学(advanced colorimetry)<sup>[11]</sup>,本书将其归结为高等色度学的核心内容。色度学的最终目标是解决复杂环境下物体颜色外貌的量度问题,而现代色度学的诞生则开始了将色度学推向最终目标的挑战。

### 3. 色貌模型的发展

从 20 世纪 90 年代开始,人们先后提出了多种色貌模型。1997 年之前主要包括 Hunt 模型(1991/1994/1996)、Nayatani 模型(1993)、ATD 模型(1995)、RLAB 模型(1996)、LLAB 模型(1996)等。这些模型对 CIELAB 存在的诸多问题做了改进。1996 年 CIE 将测试各种色貌模型的任务交给 CIE 技术委员会 TC1-34 (Testing Colour Appearance Models),并且在 1997 年 5 月发布了色貌模型 CIE CAM97s。1998 年 CIE 技术委员会八分部“图像技术”(Image Technology)成立了 CIE TC8-01 工作组“色彩管理应用中的色貌模型”(Color Appearance Model for Color Management Applications),提出进一步针对 CIE CAM97s 加以修正。2002 年第 10 届 IS&T/SID 会议上推出色貌模型 CIE CAM02,是建立在 CIE CAM97s 结构和形式上的简化和改进,于 2004 年正式发布。2005 年 11 月 12 日在 Scottsdale, AZ Minutes, CIE 技术委员会八分部第五次会议宣布, CIE 将结束 TC8-01 的研究工作,并对主席 Moroney 和全体成员卓越的工作和任务的完成表示感谢。这意味着 CIE CAM02 像最简单的 CIELAB 一样,将在国际上普遍使用。

CIE CAM02 色貌模型自 2002 年由 CIE 推荐以来,由于可以用于广泛的观察条件下预测颜色外观,提供均匀色空间,提供用于颜色管理的连接色空间,在科学研究和工业应用中广受欢迎,例如 Microsoft 公司将其应用于最新的色彩管理系统——Windows 色彩系统(WCS)中。但是,在之后的跨媒体颜色再现的图像处理应用和研究中已经确定,它存在一些数学计算

等问题,为此 CIE 提出了一些修改 CIE CAM02 模型的建议。迄今为止代表性的成果是 Changjun Li 等于 2017 年发表的 CAM16 色貌模型<sup>[147]</sup>,它改变了 CIE CAM02 模型的结构,将原始模型中在两个不同空间中完成对光源色适应和亮度适应,变化为在相同的空间完成;它不仅克服了先前的数学变换问题,而且预测视觉性能与 CIE CAM02 模型的性能一样好,比 CIE CAM02 更简单。在此模型基础上,提出了新的 CAM16-UCS 均匀颜色空间。它将成为一个可以提供用于颜色外观预测和色差评估等全面色貌模型的解决方案,以服务大部分应用。

色貌模型相关标准的发布,并不意味着色貌模型研究的结束,而是色貌模型研究的进一步开端。因为包括 CIE CAM02、CAM16 等在内的色貌模型还没有解决图像中像素作为刺激这样复杂刺激的颜色度量问题,即图像色貌模型 (image Color Appearance Model, iCAM) (简称图貌模型) 将要解决的问题。此外,在有关图像颜色方面的研究中,还包括图像差 (image differences, 即图像色差)、图像质量度量 (image quality metrics)、色域映射 (tone mapping)、HDR 图像再现 (image rendering) 等。

图貌模型是当前颜色科学与技术领域的前沿问题。现有色貌模型在很大程度上忽略了空间视觉,而以空间视觉模型为主的图像方面的研究则在很大程度上忽略了颜色问题<sup>[74,153]</sup>。下一代色貌模型需要将单独研究视觉空间特性与单独研究视觉的颜色特性相结合。为了达到图貌模型最终的目标,需要对色貌模型进行一次根本革命。改进色貌模型的许多思想已经清楚:它需要一个对图像进行简单处理的模型,这个模型要包括空间局部适应、高动态范围图像再现以及其他空间现象等几个环节;还需包括精确预测色貌属性、空间滤波 (spatial filtering for visibility of artifacts)、图像质量评价的色差标准等内容。

美国罗切斯特理工学院 (RIT) 的 Fairchild 和 Johnson 在 CIE CAM02 的基础上,提出了一个针对静态图像的色貌模型基本框架,称作图像色貌模型<sup>[74,180,181,182]</sup>。该模型涉及描述人眼空间视觉特性的对比度敏感函数 (CSF),考虑了空间特性的色差模型 S-CIELAB,以及考虑到色域映射应用的具有恒常色相特点的 IPT 色空间。这个 iCAM 描述了一种架构,为色貌模型的最终目标,即实现跨媒体图像再现、图像处理、图像色差和质量评价及高动态范围图像再现处理等提供了一个基础架构和基本处理方法。

#### 4. 光谱成像技术

颜色信息的测量、表征、传递、显示等相关理论与技术的一个重要发展趋势是向空间维、光谱维的拓展,因此必然导致光谱成像尤其是多光谱成像的理论与技术的发展。

光谱成像技术包括多光谱成像 (multi-spectral imaging)、高光谱成像 (hyper-spectral imaging) 以及超光谱成像 (ultra-spectral imaging)。其中高光谱成像和超光谱成像技术具有多波段 (通常 100 个以上)、高光谱分辨力 (通常优于  $0.01\lambda$ )、高空间分辨力等特点,因此在对地观测、空间遥感、资源探测、物质成分分析、目标识别等领域得到大力发展。但是高光谱成像和超光谱成像技术的硬件结构、采样方式等都比较复杂,因此很少用于对光谱分辨率要求相对较低的颜色测量及颜色再现领域。

多光谱成像是多波段光谱图像获取、处理、复制、显示等系列技术的简称;通常认为在可见光波段的多光谱图像的光谱分辨率大于 10 nm,该分辨率能够以较高的精度拟合或重建自然界中多数目标的辐射光谱或反射光谱信息,因此对于目标识别尤其对于颜色信息的记录及再现具有重要的价值。国际照明委员会 (CIE) 于 2002 年 11 月把多光谱成像技术列入彩色图像技术委员会的主要发展方向 (TC8-7, <http://www.cie.co.at>),表明了多光谱成像技

术在高水平颜色测量及颜色复制领域中具有重要的地位。

多光谱成像技术在颜色科学相关领域具有诸多特点或优势：①比传统的三基色测量系统的色域更广，从而有效提高颜色信息获取、传递、再现的准确性；②可以有效克服传统的三基色测量的同色异谱问题，从而实现颜色图像的标准化、高保真再现；③特别适合对复杂目标场景的光谱测量及颜色复制，如纸币、艺术品、纺织品、珠宝玉石、建筑材料、博物馆文物等。

颜色领域的多光谱成像系统一般由两部分组成：多通道光谱图像获取的光学系统以及基于多光谱成像光学系统的光谱构建及颜色再现方法（以算法为主）。经过多年的发展，目前的多光谱成像系统无论在硬件装置还是算法理论方面都已经逐渐成熟。但是，对于快速运动、光照瞬变、高动态范围的目标场景，光谱成像技术的理论与技术还有待进一步发展。

### 5. 高动态范围图像的颜色再现

在日光照明或人工照明环境下，被观测物体从阴影到白场的照度变化范围通常为  $10^1 \sim 10^5$  lx 的量级，其对应的动态范围大约为 100 000:1，但是普通可见光图像传感器的有效动态范围受到器件噪声以及电荷势阱容量的限制，通常只有 60 dB 以下，大约相当于 1 000:1。因此普通数码相机的量化精度一般都小于 12 bit，大多数商用相机的量化精度是 8 bit 的，根本满足不了 100 000:1 动态范围光照环境下的测量要求。高质量的制冷型相机的动态范围有可能超过 10 000:1，其量化精度可以采用 14 bit 或 16 bit，但也不可能满足 100 000:1 动态范围的要求。

因此，如何扩展现有成像设备光度测量的动态范围一直成为世界各国学者的努力方向。归纳起来，目前高动态范围成像技术可以分为硬件扩展技术和软件扩展技术。硬件扩展动态范围技术包含很多类型，可以大致分为传感器芯片级的硬件扩展以及传感器附加硬件扩展。芯片级的传感器硬件扩展是在传感器的成像芯片设计制造工艺上进行改进，通常是对 CCD 或者 CMOS 的单个传感单元进行重新设计，采用不同的排列方式或者采用不同感光单元组合成像<sup>[32]</sup>。硬件扩展动态范围另外一种方式是传感器附加硬件扩展，其主要方式是通过增加传感器个数来增加曝光量；或者降低空间分辨率，利用同一传感器先后进行多次曝光；也有利用前置光学系统进行空间调制分别成像的方案，例如采用数字微镜阵列或空间光调制器。在软件扩展动态范围技术方面，主要采用分时域多次曝光技术。由于硬件条件的制约，我国学者近年来主要采用软件扩展动态范围技术，个别研究也采用了硬件扩展动态范围的技术。

在高动态范围图像的跨媒体再现理论与技术方面，世界各国学者进行了多年研究，其中美国罗切斯特理工学院（RIT）的 Mark D. Fairchild 等人于 2006 推出了一种面向高动态范围图像（HDR imaging）的跨媒体色貌再现的新模型 iCAM06，其工作流程如图 0-1 所示。

### 6. 数字颜色管理系统

数字颜色管理系统（Digital Color Management System, DCMS）又称为计算机颜色管理系统，是近年来颜色科学与技术领域的一个研究及应用热点。经过多年的发展，颜色管理系统的理论与技术已经逐步成熟，其典型代表就是目前风靡全球的国际色彩联盟 ICC 颜色特性文件规范（ICC profiles specification）。该规范由最初的针对数字图文图像的色度管理系统逐步发展到今天的包含色貌、图像色貌、高动态范围图像、多光谱图像等颜色管理内容的通用技术平台，其应用领域如图 0-2 所示。

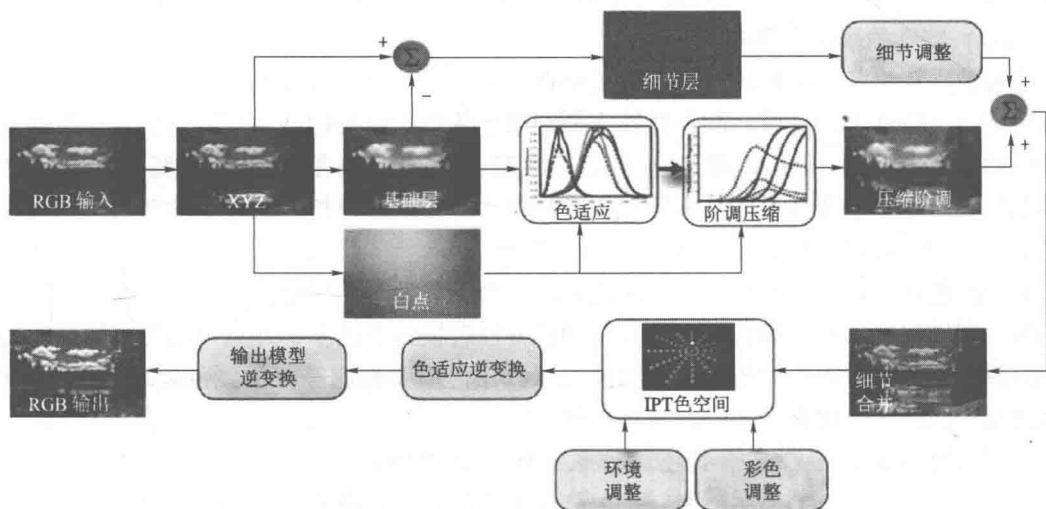


图 0-1 iCAM06 图像色貌模型工作流程

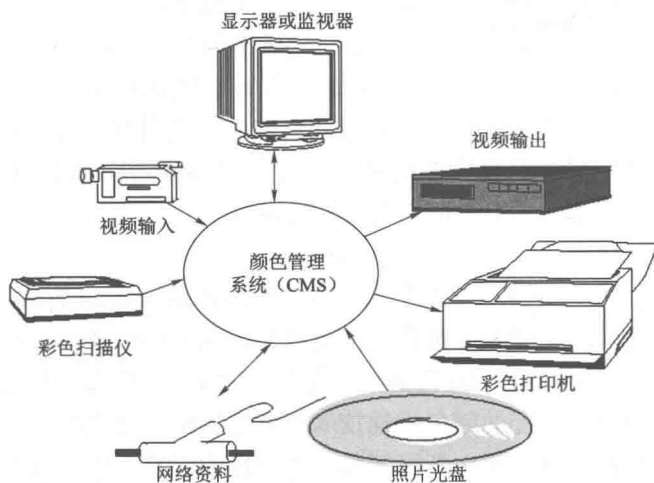


图 0-2 颜色管理系统应用领域

颜色管理系统的发展历史可以追溯到 20 世纪的 70 年代末和 80 年代初。当时的彩色电子印前系统 (Colour Electronic Prepress Systems, CEPS) 已经具有图文编辑、排版和色彩控制等功能。但是不同厂家或型号的印前系统对颜色信息的描述或转换方法互不兼容, 因此对于同一个图文信息数据采用不同的印前系统进行处理, 则很可能会产生不同的颜色效果。

颜色管理系统的主要目标就是消除不同颜色设备之间的颜色传递特性差异, 从而实现保真的或者符合用户意图 (intent) 的颜色传递和颜色再现。换言之, 在数字化颜色图文应用系统中, 倘若不进行颜色管理, 则必将出现不同设备之间的颜色信息传递或颜色复制的不一致性或失真问题。可以认为, 颜色管理系统的应用是计算机彩色图文处理技术或数字化颜色应用技术水平不断提高的必然结果。

国际颜色联盟 (ICC) 在其推出的颜色管理系统特性文件规范中对颜色管理系统的技术特点进行了说明, 其内容大体概括为: 采用独立于设备的颜色转换 (device-independent color

transformation) 模式, 建立具有开放 (open)、厂商中立 (vendor neutral) 以及跨平台 (cross-platform) 特性的颜色管理系统。

实现独立于设备的颜色转换模式的关键在于制定和建立一套设备的颜色特性描述文件系统, 简称颜色特性文件系统。颜色特性文件记录了依赖于设备的颜色空间与独立于设备的颜色空间的转换关系。这里所谓独立于设备的颜色空间应当是一种标准颜色空间, 例如 CIEXYZ、CIELAB 以及各类 CIE 标准色貌模型空间。它们可以把所有设备的颜色特性文件链接起来, 从而实现跨平台的颜色转换。

所谓颜色管理系统的开放性是指颜色管理系统的资源对于所有厂商或用户都是开放的或公开的。即任何厂商都能够将自己的设备颜色特性链接到系统中, 并且可以为其他厂商的颜色应用程序或颜色管理模块提供服务。反过来, 任何厂商都能够根据颜色管理系统的标准、规范以及资源, 开发出自己的颜色管理模块。

所谓跨媒体或跨平台是指颜色管理系统应该能够跨越颜色采集 (如扫描仪、数码相机)、颜色显示 (如 CRT 显示器)、颜色复制 (如彩色印刷或彩色打印)、颜色传递 (如互联网) 等各种媒体或平台, 实现颜色传递或表现的保真性或一致性。

经过多年的发展, 颜色管理系统已经逐步成熟, 其标志性的成果就是著名的 ICC 颜色特性文件规范 (ICC Profiles Specification), 其最新的版本为 2010 年发布的 Specification ICC. 1: 2010-12 (Profile version 4.3.0.0)<sup>[273]</sup>, 它对应于国际标准 ISO 15076-1。

值得关注的是, ICC 最近又推出了一种与时俱进的颜色管理规范 iccMAX, 它的最大特点是突破了现有 ICC 颜色特性文件规范的颜色链接空间的参考白场 D50 的限制, 但是它目前并不能完全取代现有版本的 ICC Profile Specification。

## 7. 立体颜色视觉

传统的色度学是在简单场景下以二维平面物体为颜色刺激物的基础上开展的研究工作, 实验过程对照明光源、实验刺激物等都进行了规范和简化。近年来, 随着人工智能和立体显示技术的迅猛发展, 以机器视觉、3D 电影、虚拟现实 (VR) 眼镜等为载体的硬件立体显示技术不断发展, 这对与之相匹配的颜色视觉技术的发展提出了更高的要求。

立体颜色视觉是指在三维空间中开展颜色视觉特性的研究工作。与传统的色度学研究相比, 立体颜色视觉的研究还涉及空间深度感知、空间光场、物体形状轮廓认知、左右眼图像融合等一系列影响因素。由于涉及的影响因素较多、实验场景相对复杂、各因素之间可能存在交互作用, 所以研究难度较大。要厘清这些因素对颜色视觉的影响, 我们以立体视觉的原理和认知机制为出发点, 介绍了目前常用的实验手段, 通过总结介绍上述这些因素与颜色视觉的交互作用, 可逐步将二维空间的色度和色貌模型向三维空间扩展, 为建立符合立体视觉特性的色度体系和色貌模型做铺垫。

# 第 1 章

## 颜色与视觉

颜色是人眼视觉系统对光的一种知觉。光经过物体反射或透射后刺激人眼，人眼产生了此物体的光亮度和颜色的感觉信息，并将此信息传至大脑中枢，在大脑中将感觉信息进行处理形成色知觉。颜色离不开光源、物体、人眼及大脑，而且受到人的心理因素的影响。下面就从光源、物体、人眼及大脑开始色度学的介绍。

### 1.1 颜色与光源

#### 1.1.1 可见光

人类对色彩的感知与人类自身的历史一样漫长，在新石器时代的陶器上已可见到原始人对简单色彩的自觉运用，但直到 1666 年牛顿 (Isaac Newton, 1642—1727) 利用三棱镜观察光的色散现象才认识色彩的由来。自然光通过三棱镜后分离出不同的色彩表现，称之为光谱。颜色是人眼视觉系统对光作为外界物理刺激表现出来的感觉，视觉系统对不同波长的光有不同的颜色感觉，这是最早的颜色理论，也成为颜色理论的基础。

波长为 380 ~ 780 nm 的电磁波，引起人眼颜色感觉不同，简称可见光，可见光仅仅是电磁波中很小一部分，如图 1-1 所示。紫、蓝在波长 430 ~ 470 nm；青、绿在波长 500 ~ 530 nm；黄绿、黄、橙、红在波长 620 ~ 700 nm。

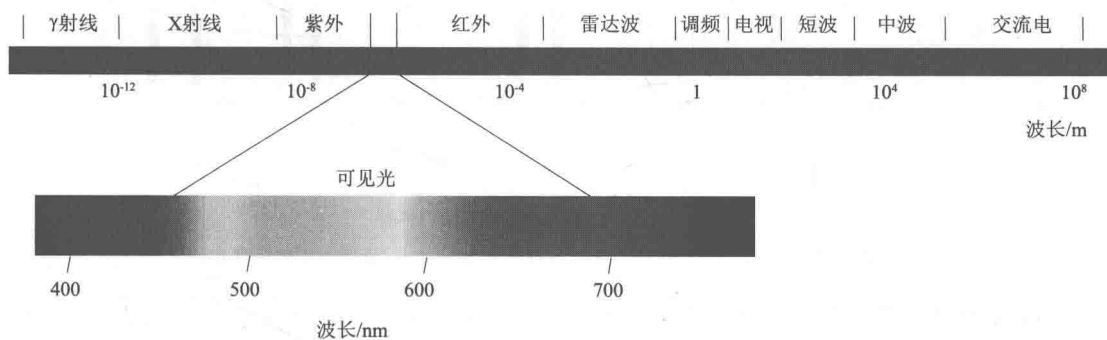


图 1-1 可见光是电磁波范围的一部分 (见彩图)

#### 1.1.2 光谱分布

光来自光源，光源特性用光谱（功率）分布来描述。光源的辐射能按波长分布的规律