

21世纪高等学校数字媒体专业规划教材



胡涛 景翠宁 编著

计算机色彩原理 及应用

0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000
0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000



清华大学出版社

21 世纪高等学校数字媒体专业规划教材

计算机色彩原理及应用

胡 涛 景翠宁 编著

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

随着计算机和互联网的应用普及,色彩作为信息的载体,也日趋于以数字化的表现形态在信息媒介中传递及再现。本书围绕色彩信息处理的数字化及其应用,在基础篇中系统地介绍了色彩感知、色彩形成及传统的和基于计算机的色彩描述的基本理论和方法等;在技术篇中介绍了基于计算机的色彩信息获取和显示再现及再现的原理及其相关设备、色彩测量和色彩管理;在应用篇中介绍了色彩在网页、动画及影视设计中的特点、作用、设计原则和方法。

本书可以作为高等学校数字媒体技术、数字印刷技术以及其他相关专业的本科教材,也可作为相关硕士学科的参考教材。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

计算机色彩原理及应用/胡涛,景翠宁编著.--北京:清华大学出版社,2014

21世纪高等学校数字媒体专业规划教材

ISBN 978-7-302-36692-8

I. ①计… II. ①胡… ②景… III. ①色彩—计算机辅助设计—高等学校—教材 IV. ①J063-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第117173号

责任编辑:郑寅堃 王冰飞

封面设计:杨 兮

责任校对:时翠兰

责任印制:宋 林

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:北京市人民文学印刷厂

装 订 者:三河市吉祥印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:21.25 插 页:2 字 数:513千字

版 次:2014年9月第1版 印 次:2014年9月第1次印刷

印 数:1~1500

定 价:39.50元

产品编号:055275-01

数字媒体专业作为一个朝阳专业,其当前和未来快速发展的主要原因是数字媒体产业对人才的需求增长。当前数字媒体产业中发展最快的是影视动画、网络动漫、网络游戏、数字视音频、远程教育资源、数字图书馆、数字博物馆等行业,它们的共同点之一是以数字媒体技术为支撑,为社会提供数字内容产品和服务,这些行业发展所遇到的最大瓶颈就是数字媒体专门人才的短缺。随着数字媒体产业的飞速发展,对数字媒体技术人才的需求将成倍增长,而且这一需求是长远的、不断增长的。

正是基于对国家社会、人才的需求分析和对数字媒体人才的能力结构分析,国内高校掀起了建设数字媒体专业的热潮,以承担为数字媒体产业培养合格人才的重任。教育部在2004年将数字媒体技术专业批准设置在目录外新专业中(专业代码:080906),其培养目标是“培养德智体美全面发展的、面向当今信息化时代的、从事数字媒体开发与数字传播的专业人才。毕业生将兼具信息传播理论、数字媒体技术和设计管理能力,可在党政机关、新闻媒体、出版、商贸、教育、信息咨询及IT相关等领域,从事数字媒体开发、音视频数字化、网页设计与网站维护、多媒体设计制作、信息服务及数字媒体管理等工作”。

数字媒体专业是个跨学科的学术领域,在教学实践方面需要多学科的综合,需要在理论教学和实践教学模式与方法上进行探索。为了使数字媒体专业能够达到专业培养目标,为社会培养所急需的合格人才,我们和全国各高等院校的专家共同研讨数字媒体专业的教学方法和课程体系,并在进行大量研究工作的基础上,精心挖掘和遴选了一批在教学方面具有潜心研究并取得了富有特色、值得推广的教学成果的作者,把他们多年积累的教学经验编写成教材,为数字媒体专业的课程建设及教学起一个抛砖引玉的示范作用。

本系列教材注重学生的艺术素养的培养,以及理论与实践的相结合。为了保证出版质量,本系列教材中的每本书都经过编委会委员的精心筛选和严格评审,坚持宁缺毋滥的原则,力争把每本书都做成精品。同时,为了能够让更多、更好的教学成果应用于社会和各高等院校,我们热切期望在这方面有经验和成果的教师能够加入到本套丛书的编写队伍中,为数字媒体专业的发展和人才培养做出贡献。

21 世纪高等学校数字媒体专业规划教材

联系人: 魏江江 weijj@tup.tsinghua.edu.cn

随着计算机、互联网、移动网络等科学技术的发展及应用普及,数字化色彩信息处理技术在数字传媒领域获得了越来越广泛的应用,并且逐渐进入人们的生活领域,而由此产生的问题及所需要的应对也从以前的专业技术领域向大众延伸。

色彩是物体反射或透射的光波能量在人类视觉系统中产生的感知,对于只能处理数字信号的计算机系统,如何将物体反射或透射的光波能量转换为数字化的色彩信息,以便由计算机计算及处理,如何在计算机显示设备上将数字描述的色彩信息再次以光波能量呈现,使视觉系统感知色彩,或者以数字描述的色彩值如何在计算机复制设备的作用下,在纸媒上重新再现可感知的色彩,色彩信息数字化及其再现对必须由视觉感知的色彩产生什么样的负面影响,如何将这些影响降低……这些问题的解决是数字媒体信息处理过程中不可避免的重要工作。

本书围绕色彩信息的基础理论、色彩信息的数字化成色理论以及色彩信息的应用 3 个方面分三篇进行讲解。第 1 篇基础篇共 6 章,围绕色彩信息的基础理论,主要介绍了色彩感知的原理和过程、色彩视觉现象及心理效应、色彩视觉理论和混色原理、基于感知的色彩描述方法、CIE 标准色度学系统、CIE 标准照明体、CIE 色度计算方法、CIE 的均匀色彩空间与颜色色差、同色异谱相关理论、为解决跨媒体颜色失真问题而建立的色貌模型及其相关理论,并对现在基于计算机的多种色彩描述方法进行了分析;第 2 篇技术篇共 5 章,系统介绍了色彩信息的数字化原理、数字化色彩信息显示及复制再现原理、再现色彩的相关设备及材料,介绍了色彩测量的不同方法和仪器,并以色彩信息的数字化处理所带来的问题为切入,介绍了色彩管理的基本概念、方法以及软件工具;第 3 篇应用篇共 3 章,主要结合数字媒体技术的应用领域,分别针对网页、动画及影视设计的特点,结合实例分析介绍了数字化色彩在各个环节中的作用、设计原则和方法。

本书可作为高等学校数字媒体技术、数字印刷技术以及其他相关专业的本科教材,也可作为相关硕士学科的参考教材,还可供从事数字化色彩信息处理领域里的技术人员参考以及对计算机色彩信息处理有兴趣的读者阅读。

本书由西安理工大学胡涛教授、景翠宁讲师共同编写,其中,胡涛做大纲统筹设计,第 1 章~第 6 章、第 10 章、第 12 章~第 14 章由景翠宁编写;第 7 章~第 9 章、第 11 章由胡涛编写。硕士生李扬、李娜、马志强、何旭武、李雪娇、李尧、张松、马伟、冯玉娜、马丽娜、王亚宁等参加了本书的资料收集整理、图表制作以及文字校对工作。在本书编写以及出版中,得到了西安理工大学以及清华大学出版社的大力支持,在此表示感谢;对本书中所引用及参考的文献原作者深表诚挚的感谢。

由于编著者水平有限,书中难免有不足和不当之处,恳请读者批评指正。

编 者

2014 年 3 月于西安理工大学

第1篇 基础篇

第1章 色彩的感知	3
1.1 光源	3
1.1.1 可见光	3
1.1.2 光源的光谱能量分布	4
1.2 物体的光谱特性	7
1.2.1 透射	7
1.2.2 反射	8
1.2.3 物体的选择性吸收和非选择性吸收	8
1.3 视觉的生理基础	12
1.3.1 眼睛的构造	12
1.3.2 光谱光视效率	15
1.3.3 视角、视力与视场	18
1.4 色彩的感知	20
1.4.1 色彩感知过程	20
1.4.2 色彩感觉的量度	21
习题1	25
第2章 色彩视觉现象及心理效应	26
2.1 几种色彩视觉现象	26
2.1.1 适应性	26
2.1.2 对比性	27
2.1.3 恒常性	29
2.1.4 光强度与色彩感觉的关系	29
2.2 色彩的心理效应	30
2.2.1 色彩的联想	30
2.2.2 色彩的象征	31
2.2.3 色彩的感觉	34
习题2	38
第3章 色彩视觉理论及混色原理	39
3.1 色彩视觉理论	39

3.1.1	三色学说	39
3.1.2	四色学说	40
3.1.3	阶段学说	41
3.1.4	色觉缺陷	42
3.2	混色原理	43
3.2.1	加色混合呈色	43
3.2.2	减色混合呈色	46
习题 3		49
第 4 章	基于色彩感知的描述	50
4.1	色彩的分类及命名	50
4.1.1	色彩的分类	50
4.1.2	色彩的命名	51
4.2	孟塞尔色彩系统	52
4.2.1	孟塞尔色彩系统概述	52
4.2.2	孟塞尔系统表色方法	53
4.2.3	孟塞尔新标系统	55
4.3	瑞典自然色彩系统(NCS)	55
4.3.1	NCS 基本色	56
4.3.2	NCS 色立体	56
4.3.3	NCS 系统表色方法	57
4.4	其他表色系统	58
4.4.1	奥斯特瓦尔德系统	58
4.4.2	中国颜色体系	60
4.4.3	OSA 匀色标	62
4.4.4	日本 CC5000 色彩图	62
习题 4		63
第 5 章	CIE 表色系统	64
5.1	色彩匹配	65
5.1.1	色彩匹配实验	65
5.1.2	色彩匹配方程	67
5.2	CIE 标准色度系统	68
5.2.1	CIE 1931 RGB 表色系统	68
5.2.2	CIE 1931 XYZ 表色系统	71
5.2.3	CIE 1964 补充色度学表色系统	86
5.3	CIE 标准照明体与标准光源	88
5.3.1	色温和相关色温	88
5.3.2	标准照明体	91

5.3.3 标准光源 93

5.3.4 光源的显色性 93

5.4 CIE 色度计算方法 95

5.4.1 CIE 三刺激值的计算 95

5.4.2 CIE 色品坐标的计算 96

5.4.3 色彩的相加计算 97

5.4.4 色彩客观三属性的计算方法 98

5.5 CIE 均匀色彩空间与颜色色差 102

5.5.1 CIE x-y 色品图上色彩的宽容度 102

5.5.2 均匀颜色空间的发展 104

5.5.3 CIE 1976 $L^* u^* v^*$ 均匀色空间及其色差公式 104

5.5.4 CIE 1976 $L^* a^* b^*$ 均匀色空间及其色差公式 107

5.5.5 CIE DE 2000 色差公式 110

5.5.6 色差单位 112

5.6 同色异谱色 113

5.6.1 同色异谱的概念 113

5.6.2 同色异谱色的辨别 115

5.6.3 同色异谱的定量评价 117

5.6.4 同色异谱的应用 117

5.7 色貌模型 118

5.7.1 色貌属性 119

5.7.2 色适应及色适应变换 119

5.7.3 几种常见的色貌模型 121

习题 5 126

第 6 章 基于计算机的色彩描述 128

6.1 RGB 色彩描述 128

6.2 CMYK 色彩描述 129

6.2.1 CMYK 色彩描述概述 129

6.2.2 CMYK 与 RGB 之间的转换 130

6.3 Lab 色彩描述 130

6.3.1 Lab 色彩描述概述 130

6.3.2 Lab 与 RGB 之间的转换 131

6.4 HSB 色彩描述 132

6.4.1 HSB 色彩描述概述 132

6.4.2 HSB 与 RGB 之间的转换 133

6.5 sRGB 色彩描述 134

6.5.1 sRGB 色彩描述概述 134

6.5.2 CIE Y_{xy} 与 sRGB 之间的转换 135

6.6 视频色彩描述	135
6.6.1 视频三基色及其获取	135
6.6.2 视频色彩的描述	137
习题 6	140

第 2 篇 技 术 篇

第 7 章 计算机的色彩信息获取	143
7.1 色彩信息数字化的基本原理	143
7.1.1 色彩信息数字化	143
7.1.2 分光	144
7.1.3 光电转换	146
7.2 扫描仪	148
7.2.1 扫描仪的工作原理	148
7.2.2 扫描仪的性能指标	154
7.2.3 扫描仪的评测	156
7.3 数码相机	159
7.3.1 数码相机的结构及工作原理	159
7.3.2 数码相机的性能指标	161
7.3.3 数码相机的校准	162
习题 7	164
第 8 章 计算机的色彩信息显示再现	165
8.1 数字化色彩信息显示呈色的基本原理	165
8.2 显示器	166
8.2.1 CRT 显示器	166
8.2.2 LCD 显示器	171
8.2.3 显示器的校准	174
8.3 投影仪	178
8.3.1 投影仪的工作原理	179
8.3.2 投影仪的技术指标	182
习题 8	183
第 9 章 计算机的色彩信息复制再现	184
9.1 数字化色彩信息复制的基本原理	184
9.2 分色技术	185
9.2.1 分色的基本原理	185
9.2.2 数字分色	186
9.2.3 黑版的生成	189

9.2.4	Photoshop 中的分色	190
9.3	数字二值化技术	195
9.3.1	抖动技术	196
9.3.2	加网技术	200
9.4	色彩复制设备	207
9.4.1	喷墨打印机	207
9.4.2	激光打印机	210
9.4.3	数码印刷系统	213
习题 9		216
第 10 章	色彩测量	217
10.1	色彩测量的基础知识	217
10.1.1	主观目测	217
10.1.2	测色仪器的几何条件	219
10.2	显示再现的色彩测量	222
10.2.1	色度测量	222
10.2.2	显示器的测色	223
10.2.3	投影仪的测色	226
10.3	复制再现的色彩测量	226
10.3.1	基于密度的色彩测量	226
10.3.2	基于分光光度的色彩测量	228
10.3.3	基于机器视觉的色彩测量	232
10.4	光源色彩特性的测量	233
10.4.1	光源光谱功率分布的测量	234
10.4.2	光源三刺激值直接测量法	235
10.5	色彩测量方法的评价	236
10.5.1	目视测量与仪器测量的比较	236
10.5.2	仪器测量法之间的比较	237
习题 10		237
第 11 章	色彩管理	238
11.1	色彩管理概述	238
11.1.1	色彩管理的必要性	238
11.1.2	色彩管理系统的基本组成	239
11.1.3	色彩管理的发展趋势	241
11.2	面向操作系统的色彩管理	242
11.2.1	基于 ICC 标准的色彩管理	242
11.2.2	基于 WCS 的色彩管理	253
11.2.3	常用的色彩管理软件	255

11.3 面向设备应用的色彩管理	258
11.3.1 显示再现的色彩信息与输入色彩信息的一致性	258
11.3.2 复制色彩信息与显示色彩信息的一致性	258
11.3.3 复制、显示与输入色彩信息的一致性	260
习题 11	260

第3篇 应用篇

第12章 网页设计与色彩	265
12.1 网页设计色彩基础知识	265
12.1.1 网页安全色	265
12.1.2 网页配色原则	266
12.1.3 网页配色方法	267
12.1.4 网页配色技巧	269
12.2 利用配色印象空间图进行网页配色	270
12.3 网页配色实例	270
习题 12	278
第13章 动画设计与色彩	279
13.1 动画中色彩的作用和特征	279
13.1.1 色彩在动画中的作用	279
13.1.2 动画色彩的特征	279
13.2 动画角色形象与色彩	282
13.2.1 色彩对动画角色的作用	282
13.2.2 动画角色色彩设计方法	284
13.3 动画场景与色彩	286
13.3.1 动画场景色彩的作用	286
13.3.2 动画场景色彩设计方法	288
13.4 动画情节与色彩	290
习题 13	292
第14章 影视设计与色彩	293
14.1 影视色彩特性	293
14.2 影视的色调	295
14.3 色彩在影视中的作用	296
14.3.1 利用色彩表现影片主题,确定影片风格	297
14.3.2 运用色彩对影片人物进行造型	297
14.3.3 用场景色彩揭示人物性格和内心世界	297
14.3.4 增强叙事效果,渲染环境,营造气氛	298

14.3.5	运用特定色彩的象征意义隐喻影片的深层意蕴	298
14.3.6	增强画面视觉美感和感染力	299
14.4	影视色彩的设计与再现	299
14.4.1	拍摄前的色彩设计	300
14.4.2	拍摄过程中的色彩选择和控制	301
14.4.3	拍摄后的色彩控制	303
习题 14		304
附录 A		305
附表 A.1	CIE 1931 RGB 系统标准色度观察者光谱三刺激值和 光谱色度坐标	305
附表 A.2	CIE 1931 XYZ 系统标准色度观察者光谱三刺激值和 光谱色度坐标	307
附表 A.3	孟塞尔明度值 V (表中记为 V) 与亮度因数 Y 之间的数值关系	309
附表 A.4	CIE 1964 $X_{10}Y_{10}Z_{10}$ 系统标准色度观察者光谱三刺激值和 光谱色度坐标	310
附表 A.5	标准照明体的光谱功率分布	312
附表 A.6	CIE 1931 色度图标准光源 A、B、C、E 恒定主波长线的斜率	315
参考文献		323

第1篇

基础篇

PART 1

第1章 色彩的感知



人类通过五大感官——视觉、听觉、嗅觉、味觉和触觉感知外部客观世界。其中，外部世界信息的 80% 都是通过视觉提供的。色彩实验表明，人们在观察物体时，首先引起视觉反应的是物体的色彩，如红色、黄色等，其次才注意到物体的形状、质感等具体细节，前 20 秒，人对色彩的注意力约占 80%。

光照到彩色物体上，经过物体选择性吸收，反射或透射出来的光线进入人眼，刺激视觉细胞产生光亮度感觉，视觉系统再将光刺激传入大脑，经过大脑的加工后产生色彩感觉。可见，要产生色彩感觉，就必须具备 4 个条件：光源、彩色物体、人眼和大脑。

1.1 光 源

光是人们感知色彩的首要条件，是产生颜色感觉的源泉，没有光刺激人眼就不会产生颜色感觉。试想如果一个人在暗室里不开灯，他能对暗室的彩色物体产生颜色感觉吗？当然不能，因为就没有光刺激他的眼睛，这时的他就和盲人一样，因此就不会有颜色感觉。可见，要产生颜色感觉，就必须有光源。

1.1.1 可见光

1. 可见光的定义

《颜色术语国家标准》(GB 5698—85)中定义：光是一种能在人的视觉系统上引起明亮颜色感觉的电磁辐射。电磁辐射的波长范围很广($10^{-15} \sim 10^8 \text{ m}$)，最短的是宇宙射线，波长最小只有 10^{-15} m ，最长的是交流电波，波长可达 10^8 m 。而可见光是能刺激人眼的那部分电磁辐射，这种电磁辐射与紫外线、红外线及其他形式的电磁辐射有着不同的物理特性，即能引起人们的颜色感觉，这部分电磁辐射只有一小部分，其波长范围为 $380 \sim 780 \text{ nm}$ 。人们把能作用于人的眼睛，并能引起明亮视觉的这部分电磁辐射，称为可见光，如图 1.1(彩图 1.1)所示。

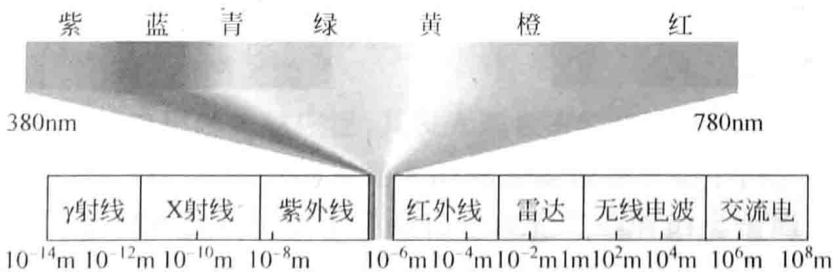


图 1.1 电磁波中的可见光谱

2. 光的色散

光的物理性质是由它的波长和能量来决定的。波长决定了光的颜色,能量决定了光的强度。光映射到人的眼睛时,波长不同,其呈现的颜色就不同,表 1.1 列出了常见色光与波长的对应关系。波长相同,而能量不同,则颜色的明暗不同。不同波长的可见光刺激人眼,会产生不同的颜色感觉,从而使人们产生各种各样的颜色感觉(注意:光本身没有颜色,颜色感觉是光刺激人眼后,通过眼睛和大脑的加工后而产生的视觉现象)。

表 1.1 常见色光与波长的对应关系

色光	波长/nm	代表波长/nm
红(Red)	780~630	700
橙(Orange)	630~590	620
黄(Yellow)	590~560	580
绿(Green)	560~500	546
青色(Cyan)	500~470	500
蓝(Blue)	470~430	436
紫(Purple)	430~380	420

为什么在太阳光下,我们会看到各种颜色?早在 1666 年,牛顿(图 1.2)在英国剑桥大学实验室里,做了一个著名的实验,即色散实验。牛顿让一束日光通过一道狭缝照射到暗室的三棱镜上,日光经过棱镜的折射后在另一侧的白屏幕上形成了一条彩色的光带,如图 1.3 (彩图 1.2)所示。其色彩从上到下依次为红、橙、黄、绿、青、蓝、紫,这就说明了白光是由不同波长的光组成的复色光,光经过棱镜时会发生折射,其波长长的光,折射率小,偏离原光线轨迹的程度小;波长短的光线,折射率大,偏离原光线轨迹的程度就大。而不同波长的光,刺激人眼后形成的颜色感觉不同,从而在白色屏幕上形成了彩色光带。

只含有一种波长而不能再分解的光,称为单色光或光谱色,实际中单色光并不存在。



图 1.2 牛顿



图 1.3 光的色散示意图

1.1.2 光源的光谱能量分布

一个光源所发射的光谱往往不是单一的波长,而是由许多不同波长的辐射混合成的复色光。光源的光谱辐射能量按波长的分布称为光源的光谱能量分布。

1. 相对光谱能量分布曲线

光源的光谱能量分布可用曲线表示。如果以光源辐射的各种波长光能量绝对值为纵坐标,以波长为横坐标作曲线,则该曲线称为绝对光谱能量分布曲线。

实际应用中,使用更多的是光谱分布的相对值而非绝对值,令光谱分布能量的最大值为“1”或其他数值,将光谱分布的其他值与之比较进行归一化,经过归一化后的光谱分布称为相对光谱能量分布(函数),记作 $S(\lambda)$ 。由相对光谱能量分布函数 $S(\lambda)$ 和波长所作的曲线称为相对光谱能量分布曲线。图 1.4 所示为白炽灯的相对光谱能量分布曲线,图 1.5 所示为常用光源的相对光谱能量分布曲线。

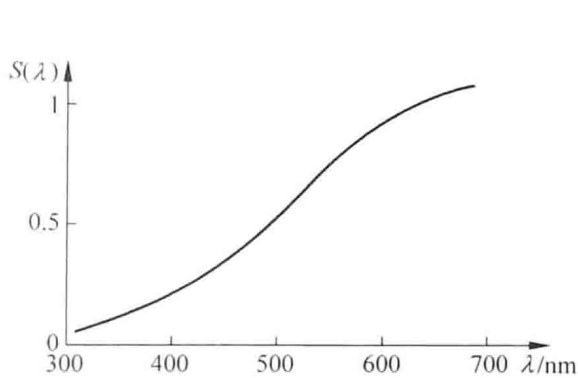


图 1.4 白炽灯的相对光谱能量分布曲线

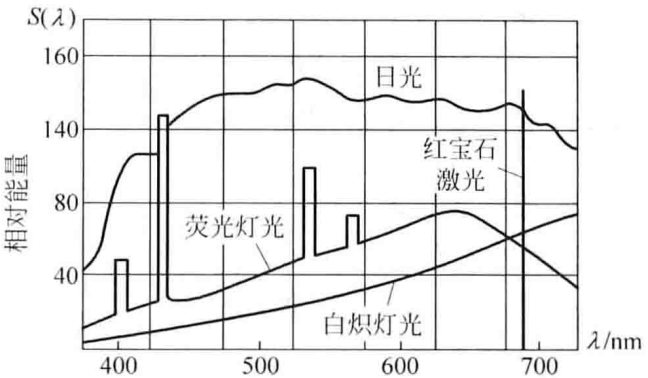


图 1.5 常用光源的相对光谱能量分布曲线

光源的颜色特性取决于光源的相对光谱能量分布,而与光谱能量的绝对值无关。绝对值的大小只反映光的强弱,不会引起光源颜色的变化。因此,知道了光源的光谱分布,就相当于知道了光源的颜色特性。从图 1.5 中可以看到,正午的日光有较高的辐射能,它除在蓝紫色波段能量较低外,在其余波段能量分布均较均匀,基本上是无色或白色的。荧光灯光源在 405nm、430nm、540nm 和 580nm 出现 4 个线状带谱,峰值在 615nm 处,而后在长波段(深红)能量下降,这表明荧光光源在蓝绿色波段(550~560nm)有较高的辐射能,而在深红波段(650~700nm)辐射能减弱。对比之下,白炽灯光源在短波蓝色波段辐射能比荧光光源低,而在长波红色区域有相对高的能量。因此,白炽灯光源总是带有黄红色。红宝石激光器发出的光,其能量完全集中在一个很窄的波段,大约为 694nm,看起来是典型的深红色。

没有一种完全的白光。尽管太阳光或人造白光在光谱分布上有很大不同,在视觉上也有一定的差别,但由于人眼有很大的适应性,因此这些光习惯上都称为“白光”。但在色彩的定量研究中,1931 年国际照明委员会 CIE 建议以等能量光谱作为白光的定义,也就是说,以辐射能作为纵坐标,光谱波长为横坐标,则等能白光的能量分布曲线是一条平行于横轴的直线。即 $S(\lambda)=C(\text{常数})$ 。另外 CIE 还规定了一些标准光源如标准光源 A、B、C 及 D 系列(D_{50} 、 D_{65} 、 D_{75} 等),将在 5.3 节中介绍。

发光二极管 LED 的应用越来越广泛,其发光颜色有红色、橙色、绿色(又分黄绿、标准绿和纯绿)、蓝色和白色等,每一种颜色的发光管的光谱能量分布都不同。图 1.6 是一种绿色发光二极管的光谱能量分布曲线。图 1.7 是白色发光二极管的光谱能量分布曲线。白光 LED 的发射波长包括蓝光和黄光区域的峰值,但是在肉眼看来是白色,这与人眼对不同波长的光的相对敏感性 $V(\lambda)$ 有关。