

高二物理竞赛 • 全部

学而思

目录

第一章 序	11
1.1 说在一切前面	11
1.2 本书编排	11
1.3 预备知识	11
1.3.1 力学	11
1.3.2 电磁学	11
1.3.3 热学	11
1.3.4 光学	11
1.3.5 近代物理	11
1.3.6 数学	11
第二章 运动学	13
2.1 时空与物质	13
2.1.1 时空观, 坐标系	13
2.1.2 物质	15
2.1.3 参考系, 物理规律与其不变性	17
2.2 运动的描述	18
2.2.1 质点的运动	18
2.2.2 刚体的运动	25
2.3 参考系变换	27
2.3.1 点变换	27
2.3.2 刚体变换	29
2.4 运动的牵连	29
2.4.1 接触系	29
2.4.2 纯滚系	30
2.4.3 约束系	31
第三章 动力学	33
3.1 牛顿定律	33
3.1.1 概述	33
3.1.2 牛顿第一定律	34
3.1.3 牛顿第二定律	34
3.1.4 牛顿第三定律	35
3.1.5 质点系与它的牛顿定律	36
3.1.6 非惯性系的处理	38
3.2 动量定律	38

3.2.1	质点的动量	38
3.2.2	质点系的动量	39
3.3	角动量定律	40
3.3.1	质点的角动量	40
3.3.2	质点系的角动量	41
3.4	能量定律	42
3.4.1	质点的动能	42
3.4.2	质点系的动能	42
3.4.3	其它能量形式	43
3.5	位力定律 *	46
3.5.1	质点的位力	46
3.5.2	质点系的位力	47
3.6	碰撞问题	48
3.6.1	二质点正碰	48
3.6.2	自由刚体的碰撞	51
3.6.3	多体碰撞	51
第四章	静力学	53
4.1	约束	53
4.1.1	约束分类	53
4.1.2	广义坐标与自由度	56
4.1.3	约束力与广义力	58
4.2	力系化简	61
4.2.1	静力学公理体系	61
4.2.2	力系向一点简化	65
4.3	平衡问题: 矢量力学	67
4.3.1	平衡问题的要素	67
4.3.2	平衡条件与判据	67
4.3.3	亚静定, 静定与超静定	69
4.4	平衡问题: 虚功原理	70
4.4.1	理想约束	70
4.4.2	亚静定问题的虚功原理	71
4.4.3	静定问题的求解	71
4.5	分析力学初步 *	72
4.5.1	用广义坐标表示能量	73
4.5.2	拉格朗日方程	75
4.5.3	再论冲击问题	77
4.6	平衡态稳定性	78
4.6.1	一自由度体系	78
4.6.2	多自由度体系	78
第五章	简谐振动	79
5.1	方程与谐振	79
5.1.1	简谐振动的定义	79
5.1.2	简谐振动的性质	79

5.1.3	简谐振动的判定	80
5.1.4	小振动	81
5.2	阻尼振动与受迫振动	82
5.2.1	阻尼振动	82
5.2.2	受迫振动	84
5.3	多自由度小振动 *	88
5.3.1	基于线性代数与分析力学的简正坐标求解	90
5.3.2	基于对称性的简正模判定与简正频率求解	94
5.4	非线性摄动 *	100
5.5	格波	100
第六章	万有引力	105
6.1	有心力下质点运动	105
6.1.1	运动的一般特征	105
6.1.2	有心力问题的求解	106
6.2	万有引力下天体运动	109
6.3	二体与潮汐	110
第七章	刚体	111
7.1	刚体的物理描述	111
7.2	平面平行运动	113
7.3	空间刚体运动 *	114
第八章	弹性体	117
8.1	弹性体的物理描述	117
8.2	弹性棒, 弹性绳, 弹性膜与弹性体	121
8.2.1	弹性棒	121
8.2.2	弹性绳	122
8.2.3	弹性膜	123
8.2.4	弹性体 *	124
8.3	弹性波	125
8.3.1	分离变量法	125
8.3.2	变量代换法	126
8.3.3	多维情况	126
8.3.4	再论格波	128
第九章	流体	129
9.1	流体的物理描述	129
9.2	定常流动动力学	132
9.3	黏滞流体动力学	133
9.4	流体中的波	134
9.5	波的色散	134
第十章	相对论	135
10.1	相对论运动学	135
10.2	相对论动力学	136

10.3 相对论连续物质	138
10.4 相对论电磁场	139
第十一章 热力学第一定律	141
11.1 热力学第零定律	141
11.2 热力学第一定律	142
11.2.1 准静态与非准静态过程	142
11.2.2 内能	143
11.2.3 功	144
11.2.4 热量	144
11.2.5 耗散	145
11.3 理想气体	146
11.3.1 理想气体的定义	146
11.3.2 理想气体物态方程	147
11.3.3 混合理想气体	149
11.3.4 理想气体的过程	150
11.4 开放系统的理想气体	154
11.4.1 静态平衡问题——重力场中的大气	154
11.4.2 能量守恒——伯努利方程	155
11.4.3 动量守恒——欧拉方程	156
第十二章 热力学第二定律	159
12.1 循环过程	159
12.1.1 热机与热泵	159
12.1.2 热机循环	162
12.2 理想气体的熵	164
12.3 热力学第二定律	166
12.4 熵的计算	169
12.4.1 理想气体的熵	169
12.4.2 固定热容固体熵	170
12.4.3 大热容恒温热库	170
12.4.4 传热熵	170
12.4.5 混合熵	170
12.5 热力学函数与其特性	172
12.5.1 四个热力学函数与四个状态参量	172
12.5.2 若干定理的证明	173
12.5.3 自由能的含义	178
12.5.4 化学势	179
12.6 近平衡态热力学 *	180
12.6.1 线性输运现象	180
12.6.2 传热的熵产生	183
12.6.3 普遍理论与昂萨格倒易关系	183
12.6.4 推证热电耦合的普遍规律	184

第十三章 液体与固体的性质	187
13.1 固体晶格论	187
13.1.1 经典晶格论	187
13.1.2 量子晶格论 *	190
13.2 固体电子论 *	195
13.2.1 德鲁特模型	195
13.3 液体的物态性质	196
13.3.1 液体性质综述与其微观成因	196
13.3.2 热容	198
13.4 液体的表面性质	198
13.5 极端条件下的其他物态	199
第十四章 相与相变摘要	201
14.1 相平衡	201
14.2 气液相变	201
14.3 连续相变	202
14.4 拓扑相变	202
第十五章 统计物理基础摘要	203
15.1 数学基础	203
15.1.1 概率与独立性	203
15.1.2 随机变量及其数字特征	204
15.1.3 信息熵	205
15.2 统计假设	209
15.3 麦克斯韦分布律	210
15.4 能均分定理	210
15.5 功, 热, 熵	210
15.6 量子与相对论	210
第十六章 光波与光线	211
16.1 界面上的反射与折射	211
16.1.1 光波与光线	211
16.1.2 菲涅尔公式	213
16.2 光线方程	217
16.2.1 光线方程与折射定律	217
16.2.2 光力类比	218
16.3 费马原理	219
第十七章 光学成像	221
17.1 傍轴光成像	221
17.1.1 物与像	221
17.1.2 球对称成像系统与符号法则	222
17.1.3 光具组成像	224
17.2 理想成像系统	225
17.2.1 作图法	226
17.2.2 基点基面性质	227

17.2.3 实例与望远系统	228
17.3 更多讨论 *	230
17.3.1 理想成像本质	230
17.4 非傍轴成像	232
第十八章 光学仪器知识摘要	233
18.1 光度学	233
18.1.1 色度学 *	233
18.1.2 国际单位与光度函数	237
18.1.3 亮度与照度	239
18.2 光阑与光瞳	239
18.3 眼睛	239
18.4 显微镜	239
18.5 望远镜	239
18.6 照相机	239
第十九章 静电学	229
19.1 电荷与电场	229
19.1.1 电磁相互作用与电荷	229
19.1.2 库仑定律	230
19.1.3 电场	230
19.2 两个定律与电势	233
19.2.1 电场的高斯定律	234
19.2.2 电势与电场的环路定律	235
19.2.3 总结	236
19.3 静电能	237
19.3.1 静电势能	237
19.3.2 自能与相互作用能	238
19.3.3 电场能	240
19.4 电荷体系	241
19.4.1 电偶极子	241
19.4.2 电荷密度	244
19.4.3 极化强度	245
19.4.4 若干对称带电体系的电场	247
第二十章 导体与介质	251
20.1 导体与静电平衡	251
20.1.1 绝缘体与导体	251
20.1.2 导体的特点	252
20.1.3 常见简单体系	256
20.2 电像法	258
20.2.1 半无限大空间的电像法	258
20.2.2 球面外与球面内的电像法	259
20.3 电介质	261
20.3.1 微观角度理解极化	262

20.3.2 宏观角度理解极化	264
20.3.3 微观与宏观的联系	268
20.4 再议静电能	269
第二十一章 稳恒电流	273
21.1 稳恒电流描述与形成	273
21.1.1 德鲁特模型	273
21.1.2 费米气观点 *	274
21.1.3 能带论 *	276
21.1.4 惯性, 阻尼与回复力	278
21.1.5 稳恒电流与形成条件	279
21.2 电路与电路方程	281
21.3 电路分析基础	284
21.3.1 电路的整体结构与拓扑学结论	284
21.3.2 电路问题的求解套路	287
21.4 电路分析方法	288
21.5 半导体	289
第二十二章 静磁场	291
22.1 电流与磁场	291
22.1.1 磁场地位与电流分布	291
22.1.2 毕奥-萨伐尔定律	292
22.2 两个定律与矢势	292
22.2.1 磁场环路定律	292
22.2.2 矢势与磁场高斯定律	293
22.3 电流体系	293
22.3.1 磁偶极子	293
22.3.2 磁化强度	294
22.3.3 若干对称体系的磁场	294
22.4 磁介质与磁能	295
22.4.1 微观角度理解磁化	295
22.4.2 宏观角度理解磁化	296
22.4.3 磁场能量	296
第二十三章 电磁感应	297
23.1 动生电动势	297
23.2 感生电动势	297
23.3 自感与互感	298
第二十四章 麦克斯韦方程组	299
24.1 麦克斯韦方程组	299
24.1.1 位移电流假说	299
24.1.2 麦克斯韦方程组	301
24.1.3 电荷在电磁场中的运动	305
24.2 平面电磁波	306
24.2.1 真空中的电磁波	306

24.2.2 介质中电磁波的传播	307
24.3 电磁场能量与动量	309
24.4 电磁波辐射	309
24.4.1 电磁辐射概论	309
24.4.2 偶极辐射	310
24.4.3 辐射的相对论变换	311
24.5 电磁学单位制	311
24.5.1 高斯单位制	311
24.5.2 洛伦兹-亥维赛单位制	311
24.5.3 自然单位制	311
第二十五章 交流电路	313
25.1 相量表示	313
25.1.1 拟稳条件与交流元件	313
25.1.2 电阻, 电容, 电感特性	313
25.2 常见电路	315
25.2.1 谐振电路	315
25.2.2 滤波电路	315
25.2.3 电报线方程, 再论拟稳条件	315
25.3 变压器	315
25.3.1 磁路定律	315
25.3.2 理想变压器条件	315
25.4 电能传输	315
25.4.1 发电机与电动机: 三相绕组	315
25.4.2 变电站与电线损耗	315
25.4.3 市电规范	315
25.4.4 电源适配器	315
第二十六章 光的干涉	317
26.1 标量波理论	317
26.2 分波面干涉	321
26.3 分振幅干涉	322
26.4 偏振干涉	323
26.5 相干性	325
第二十七章 光的衍射	327
27.1 光栅与波带片	327
27.2 衍射积分公式	328
27.3 波前分析法	328
第二十八章 物理光学	329
28.1 经典色散理论	329
28.1.1 复波矢与复折射率	329
28.1.2 经典电子论的解释	332
28.1.3 * 辐射阻尼与散射截面	335

第二十九章 量子论	339
29.1 黑体辐射	339
29.2 光粒子性	340
29.3 玻尔原子	341
29.4 物质波与波函数	341
第三十章 物理学尺度	343
30.1 宇观	343
30.2 宏观	343
30.3 介观	343
30.4 微观原子	343
30.5 微观亚原子	343

第十八章 光学仪器知识摘要

我们暂时不讨论光的干涉与衍射, 故暂时不太需要光的波动理论. 但实际上到了实用的层面上, 各个光学仪器, 从原理上说尽管几乎只用到几何光学的内容, 似乎也是避不开对光的强度的讨论的. 故本章先对在光的波动学说成型之前就已经蓬勃发展起来的**光度学**(photometry) 进行说明. 然后从若干方面对实用度最高的一些光学仪器做未免以偏概全的介绍.

18.1 光度学

光源产生的光, 在光学系统中可能被光学仪器最终接收, 如**光电二极管**(photodiode), **电荷耦合元件**(charge-coupled device, CCD) 等. 也可以直接被人眼所直接观察. 很明显, 不同仪器作为探测仪器用时, 其光谱响应将存在很大的区别. 然而, 既然是光学, 从古到今仪器的设计都是围绕人的视觉展开. 即最核心的波段是可见光波段. 只是, 随着科技的发展, 眼睛的作用逐渐被物理仪器所替代, 对光的探测也逐渐融入了更大范围的对电磁辐射的探测中, 后者即**辐射度量学**(radiometry). 比如当今天体物理中用到的各种探测手段, 从波长最长的关于宇宙微波背景的射电探测, 到波长最短的中子星 γ 射线暴的探测, 俨然不再是古人仰观星空可以达到的广度和深度. 辐射度量学以能量作为最基本的物理量进行测量, 单位就是焦耳, J. 但是如果是考虑日常生活中以人眼视觉为核心设计的各类照明, 媒体灯光, 红外线, 紫外线以外的波段几乎就被我们排除在外. 为了将辐射度量学过渡到光度学我们需要先对人眼的独特的色视觉做一个了解:

18.1.1 色度学 *

大部分人类的视网膜内有两种大类的视觉感受细胞¹: **视锥细胞**(cone) 与**视杆细胞**(rod). 而视锥细胞又根据其所含视蛋白质分为感受 500 – 700nm 波长的**视红素**细胞 (erythrolabe, L, ρ); 感受 450 – 630nm 波长的**视绿素**细胞 (chlorolabe, M, γ) 和感受 400 – 500nm 波长的**视蓝素**细胞 (cyanolabe, S, β)². 而视杆细胞由于结构差异导致比视锥细胞敏感约 100 倍, 单光子即可激发其**视紫素**(rhodopsin, R) 使其产生信号. 视紫素的合成需要依赖维生素 A. 而维生素 A 的摄取除了动物性食物源还可以来自植物性植物中含有的 β -胡萝卜素.

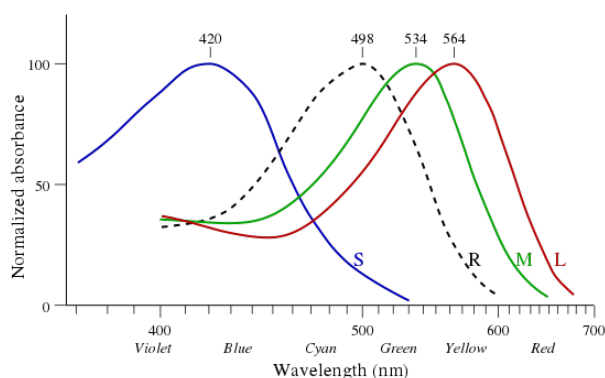


图 18.1: 四种感光细胞约化吸收率

四种感光细胞对不同波长的光响应强度^{18.1}是不一致的. **亮视觉**(photopic vision) 才具有真正意义上的色视觉: 此时三种色素细胞 L, M, S 同时工作分管长, 中, 短波段的信号激励. 使得在可见光范围内的不同类似的光对三种色素细胞给出不同的激励值. 影响人对色彩的判断. 而在**暗视觉**(scotopic vision) 下前三种细胞失效, 视杆细胞积极发挥功能, 其视紫素 R

¹ 还有**内在光敏视网膜神经节细胞**(intrinsically photosensitive retinal ganglion cells, ipRGCs), 它含有**视黑素**(melanopsin), 无法造成成像视觉, 但是在调节人昼夜节律方面发挥了主要功能.

² 在女性中常见异常 X 染色体导致个体产生四种色素的视锥细胞从而其色视觉明显优于一般的男性或女性

在 450 – 550nm 波长范围有较强的吸收, 但是无法鉴别光的颜色. 所以暗视觉给人感觉接近灰度图, 同时红色物体在黑暗环境下比其它颜色物体更加昏暗. 这被称作**浦金野现象**(Purkinje effect). 而有月光或星光的夜晚, 黎明与黄昏, 其实光线并没有暗到足够使得亮视觉失效. 此时的视觉称作**中间视觉**(mesopic vision).



图 18.2: 浦金野现象

不同人的视觉条件当然存在区别. 粗的层面讲, 一束 555nm 的位于人类视觉最敏感区的绿光和一束可见光边缘的 700nm 的红光, 都给出 $1\text{W}/\text{m}^2$ 的平面波, 给人造成的亮度感觉一定是不一样的: 前者非常明亮而后者几乎不可见. 但是如果将一红一蓝两聚光灯聚焦于舞台再找两个人来比较哪个光斑更亮, 也许两个人就会给出不同的结果. 这种不同可能出于心理上或者生理上的效应. 但是如果要为照明制定标准, 就应该克服人与人之间的区别, 一般采取从大量受试者判断结果选取多数人的结果的方式. 这样就有了**国际照明协会**(Commission Internationale de l'éclairage) 在 1931 年通过的 CIE1931 标准. 它目前仍在广泛地被使用.

CIE1931 标准将人眼中三种色素细胞的响应抽象为**三激励值**(tristimulus values). 并将描述光的色彩, 亮度的空间抽象为**色彩空间**(color space). 而色彩空间中的点就表示一种混合光可能的色彩与亮度, 对应三激励值 L, M, S , 构成一种加性空间: 三激励值的大小代表抽象的人眼对三种抽象激励的反应. 如果以这三个参数建立坐标系表示色彩, 就称作 LMS 空间. 但是实用场合更常用的是另一套更直观三激励值 XYZ 形成的空间. 它是这样定义的:

- Y 定义为 L, M, S 的某种组合使得其恰好与混合光视觉亮度基本一致.
- Z 被直接定义为 S 值的某个倍数.
- X 定义为 L, M, S 的另一种组合使得对于所有的单色光 X 总是非负且对于可见光的矩形光谱, $X = Y = Z$.

这样经过调整就得到 CIE1931 标准**色匹配函数**(color matching functions). 它表示不同单位能流密度的光对人眼造成的 XYZ 三激励值:

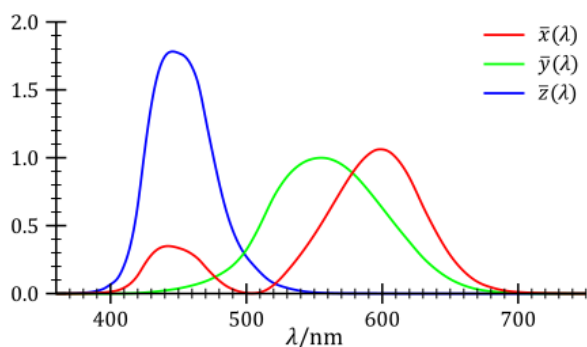


图 18.3: 色匹配函数

直观上来看, 色匹配函数可以根据通过入射光的谱计算三激励值. 例如入射光如果总能量为 E , 那么按照波长分解为:

$$E = \int e(\lambda) d\lambda$$

从而由三激励函数 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ 三激励值就是:

$$X = \int \bar{x}(\lambda) e(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int \bar{y}(\lambda) e(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \int \bar{z}(\lambda) e(\lambda) d\lambda$$

从图中定性上可以看出 XYZ 三值的含义为：光越亮 Y 越大，相对 X, Z 值 Y 激励大则说明光中绿光成分多；光中的蓝紫光成分越多 Z 约大；最后 X 值越大主要说明光中的红黄光比例多，但是实际上在 $400 - 500\text{nm}$ 的较短波长的光也能造成一定的 X 激励。

人类对色彩的理解可以分为两个大的部分：**亮度**(brightness) 与 **色度**(chromaticity)。前者为与光源亮度相匹配的关于光的整体刺激值的指标，与三刺激值的 Y 值直接对应。后者则是独立于亮度的纯粹描述三刺激值混合比例的性质。而色度由于三刺激值比例接近 $1:1:1$ 时给出特殊的色彩感受：白色。故确定好白点之后又可以细分为**色相**(hue) 和**饱和度**(saturation)。饱和度为零对应的颜色即黑，白，灰。随着饱和度增加，较低饱和度的图像一般柔和，粉润；较高饱和度的图像则对比鲜明，大红大绿，视觉冲击力较强。色相则较为复杂，可以参考下面要介绍的色度图。

为了更准确地单独描述色度，我们引入导出的色度参数：

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

由于 $x+y+z=1$ ，故通常 $z=1-x-y$ 由 x, y 来确定。我们就可以用 x, y 来描述色度，用 Y 来描述亮度。尤其是，把不同 (x, y) 值对应的颜色画在一个图中，就构成了著名的**色度图**(chromaticity diagram)³。

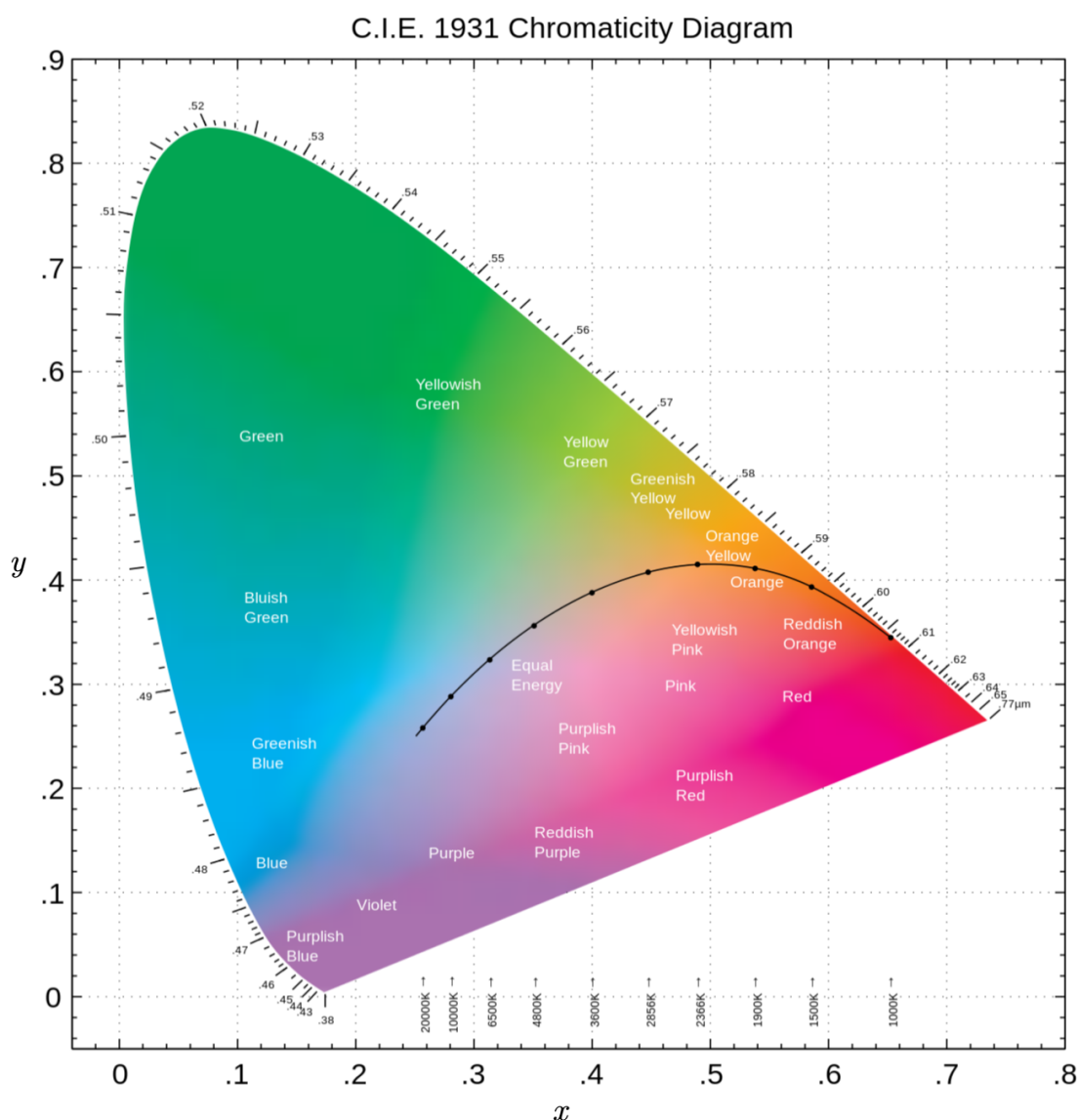


图 18.4: CIE1931 色度图

³由于打印机颜料限制你看到的色度图边缘颜色其实已经失真了。

从色度图上可以读出:

- 并不是色度图上每一个点都代表实际的某种光产生的三激励值. 而是分布在一个舌形的**视觉色域**(gamut of vision) 中. 例如 $(X, Y, Z) = (0.5, 0.1, 0.4) = (x, y, z)$ 就不是一个存在于自然界的色彩. 除非考虑生理视觉的非线性效应否则无法产生这样的三激励值, 它们对应**不可能颜色**(impossible color).
- 视觉色域被包含在由**光谱色线**(spectral locus) 和**紫红色线**(line of purples) 组成的凸轮廓内. 轮廓上就是饱和度为 1 的色彩, 它包括两类色相: 由所有单色可见光带来的色彩都在这个轮廓的曲边缘上, 即光谱色线, 色相就是我们常说的红, 橙, 黄, 绿, 青, 蓝, 蓝紫; 由可见光边缘的红色与紫色混合形成的色彩都在这个轮廓的直边缘上, 即紫红色线, 色相包括蓝紫, 紫, 红紫, 品红, 红.
- 光谱色线对光波长的分布绝不是均匀的. 小于 470nm 和大于 600nm 的紫, 红光造成的三激励值区别不大, 在色度图中压缩在较短的两端色线内. 黄绿蓝三色在色度图中具有较长的色线.
- 一般定义**白点**(white point) 为矩形光谱 (单位波长间隔具有相等能量 $e(\lambda) = \text{const.}$) 所对应的点, 按照三激励值定义它为 $(x, y) = (1/3, 1/3)$. 白点的饱和度定义为零.
- 白点与边缘点的连线上所有颜色共享一个色相, 饱和度从中心的 0 过渡到边缘的 1.
- 混合两种颜色的光时得到的颜色将落在色度图两颜色代表的点的连线上某点代表的颜色上.
- 图中还标出了**普朗克色线**(Planckian locus). 它们表示不同温度下黑体辐射光谱在可见光波段进行混合导致的色彩. 它历经的颜色为: 红, 橙, 橘黄, 淡黄, 白, 淡蓝.

为了方便显示与印刷行业, 在色度图中选取**原色**(primary colors) 作为表示颜色的三个基, 进行混合就能产生色度图中一定范围内的色彩. 一般用的多的是**RGB 三色模型**(trichromatic RGB model). 在 1931CIE 标准中选取的三原色均来自可见光谱的红绿蓝三种单色光, 波长分别为 700nm, 546.1nm, 435.8nm, 定义其 (r, g, b) 值分别为 $(1, 0, 0)$, $(0, 1, 0)$, $(0, 0, 1)$.

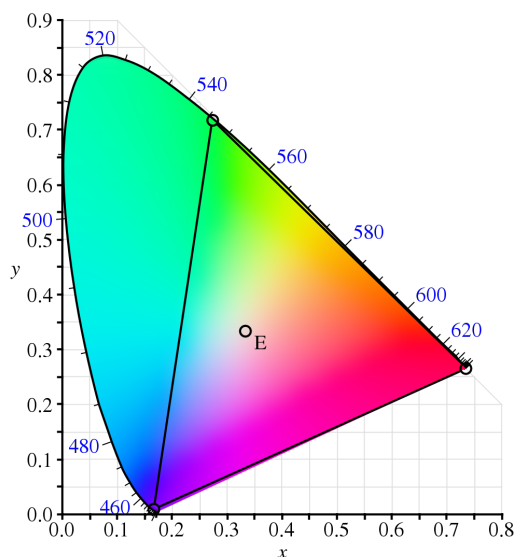


图 18.5: CIE1931-RGB 色域

这实际上对应了一个线性变换:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{0.17697} \begin{bmatrix} 0.49000 & 0.31000 & 0.20000 \\ 0.17697 & 0.81240 & 0.01063 \\ 0.00000 & 0.01000 & 0.99000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

并且 (r, g, b) 值定义为:

$$\begin{aligned} r &= \frac{R}{R + G + B} \\ g &= \frac{G}{R + G + B} \\ b &= \frac{B}{R + G + B} \end{aligned}$$

RGB 模型将三原色进行一定比例的混合后无法覆盖色度图中的每个颜色, 而是只能产生以三原色为顶点的三角形中的色彩. 而不同行业, 乃至同一行业的不同规范使用的三原色标准点也是各不相同的. 从而也就具有不同形状的**色域**(color gamut). 例如由惠普与微软与 1996 年提出了用于显示器, 打印机与因特网的 sRGB 标准就仅涵盖 40% 的视觉色域面积.

CIE 在 1931 年之后还相继公布了 1964, 1976 标准, 时代在进步, 关于色彩的理论和技术都在慢慢发展与变革. 后世新的标准将会逐渐取代旧标准.

18.1.2 国际单位与光度函数

对于光度学, 国际单位制有一基本单位给一个光度学物理量: **发光强度**(luminous intensity). 这个基本单位为**坎德拉**(candela). 众所周知, 物理量的大小总是与一定的测量过程对应, 而其单位总是与测量所采用的标准相对应. 那么以下国际单位中有关测量和其标准的规定就定义了发光强度和坎德拉两个概念:

坎德拉 (cd) 的定义为: 取千克, 米和秒的国际单位定义. 则频率为 $540 \times 10^{12}\text{Hz}$ 的单色光源辐射的发光效率具有固定的数值: $683 \text{ cd} \cdot \text{sr/W}$.

这其实就是说, 如果一个频率为 $540 \times 10^{12}\text{Hz}$ 的单色点光源向四面八方均匀发光, 辐射强度为 1W/sr (即具有总功率 $4\pi\text{W}$). 则其具有的发光强度就规定为 683cd . 这样任意一个同为 540THz , 即约 555.016nm 的单色光源的发光强度就可以进行测量: 只需要看其辐射强度为之前的辐射强度为 1W/sr 的光源的 x 倍, 那么相应的发光强度就是 $x \cdot 683\text{cd}$.

但是这就带来一个问题, 如何定义一个波长非 555.016nm 的单色光源, 或是非单色光源的发光强度? 这就又重新依赖于国际单位制以外的标准, 依然以 CIE1924 标准为例, 它定义了一个**光度函数**(luminosity function). 它可以想象为利用同为 1W/sr 的不同波长的单色光照明对人造成的相对视觉亮度. 实验发现人在 555nm 左右的绿光最敏感, 看上去光最亮. 故作为标准规定此时光度函数值为 1. 其他光度函数值均相对这个标准值比较. 其值见下一页表格^{18.24}.

这个函数就给出了波长为 λ 的单色点光源辐射强度 I 与其发光强度 \mathfrak{I} 之间的换算关系, 本书用斜体罗马字母表示光度量而哥特体字母表示原始的辐射度量:

$$I = 683.002^5 \text{ cd} \cdot \text{sr/W} \cdot V(\lambda) \cdot \mathfrak{I}$$

最后, 如果光源发光为连续谱, 那么就定义其辐射强度谱函数 $i(\lambda)$:

$$\mathfrak{I} = \int i(\lambda) d\lambda$$

于是发光强度就为:

$$I = 683.002 \text{ cd} \cdot \text{sr/W} \cdot \int V(\lambda) i(\lambda) d\lambda$$

最好的方式是吧辐射强度谱函数 $i(\lambda)$ 换算为发光强度谱函数 $i(\lambda)$:

$$I = \int i(\lambda) d\lambda$$

$$i(\lambda) = 683.002 \text{ cd} \cdot \text{sr/W} \cdot V(\lambda) \cdot i(\lambda)$$

逐渐的我们体会到, 任何描述辐射度量的物理量, 按照波长进行分解后, 乘以固定的系数 683.002 与对应波长的光度函数以后, 再对不同波长重新合成, 就构成了描述光度量的函数⁶. 从而有以下对应关系, 下一小节我们讲介绍关键的光度学量:

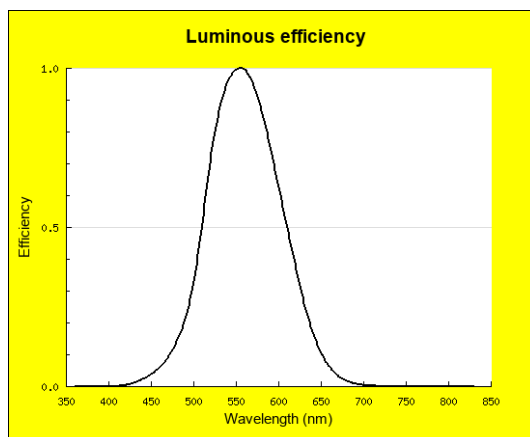


图 18.6: 光度函数图像

⁴ 此为较粗的数据表格, 更详细的数据可以参考 <http://cvrl.ioo.ucl.ac.uk/cie.htm>

⁵ 你没看错, 由于国际单位制 (SI) 与国际照明协会 (CIE) 标准不统一 (540THz 定标与 555nm 定标) 而是略有差距, 导致非 555nm 的 540THz 处光度函数小于 1 而需要靠略大于 683 的系数来补偿.

⁶ 这是一种广义的“点乘”或“内积”, 你体会到了吗?

表 18.1: 光度学与辐射度量学的对应

光度学量	国际单位	辐射度量学量	国际单位
光能量 (luminous energy)	lm · s, (T)	能量	J
光功率 (luminous power)	lm	(辐射) 功率 (radiant power)	W
光通量 (luminous flux)		辐射通量 (radiant flux)	
发光强度 (luminous intensity)	cd	辐射强度 (radiant intensity)	W/sr
亮度 (luminance)	cd/m ² , (nit)	辐射率 (radiance)	W/sr · m ²
照度 (illuminance)	lm/m ² , lx	辐照度 (irradiance)	W/m ²
光出射度 (luminous exitance)		辐射度 (radiosity)	

表 18.2: 光度函数表

λ/nm	$V(\lambda)$	λ/nm	$V(\lambda)$	λ/nm	$V(\lambda)$	λ/nm	$V(\lambda)$	λ/nm	$V(\lambda)$
380	3.90E-05	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
385	6.40E-05	455	4.80E-02	525	7.93E-01	595	6.95E-01	665	4.46E-02
390	1.20E-04	460	6.00E-02	530	8.62E-01	600	6.31E-01	670	3.20E-02
395	2.17E-04	465	7.39E-02	535	9.15E-01	605	5.67E-01	675	2.32E-02
400	3.96E-04	470	9.10E-02	540	9.54E-01	610	5.03E-01	680	1.70E-02
405	6.40E-04	475	1.13E-01	545	9.80E-01	615	4.41E-01	685	1.19E-02
410	1.21E-03	480	1.39E-01	550	9.95E-01	620	3.81E-01	690	8.21E-03
415	2.18E-03	485	1.69E-01	555	1	625	3.21E-01	695	5.72E-03
420	4.00E-03	490	2.08E-01	560	9.95E-01	630	2.65E-01	700	4.10E-03
425	7.30E-03	495	2.59E-01	565	9.79E-01	635	2.17E-01	705	2.93E-03
430	1.16E-02	500	3.23E-01	570	9.52E-01	640	1.75E-01	710	2.09E-03
435	1.68E-02	505	4.07E-01	575	9.15E-01	645	1.38E-01	715	1.48E-03
440	2.30E-02	510	5.03E-01	580	8.70E-01	650	1.07E-01	720	1.05E-03
445	2.98E-02	515	6.08E-01	585	8.16E-01	655	8.16E-02	725	7.40E-04
450	3.80E-02	520	7.10E-01	590	7.57E-01	660	6.10E-02	730	5.20E-04

18.1.3 亮度与照度

从实用主义的角度来看, 首先我们关心一个点光源单位时间发出的能量, 或者单位时间通过空间中某个指定的面的光具有的能量, 这个量就是功率或辐射通量, 两者具有共同的单位瓦特, 前者其实就是后者当面闭合且包裹光源时的情形. 与之对应的光度学物理量就是**光通量**(luminous flux, lumens), 国际单位就是**流明**(lumen). 记做 lm. 它是一个实用频率非常高的单位, 从电灯发光的强度描述, 到室内照明的规范标准都可以看到它的身影. 对于 555nm 的单色绿光, 1W 的辐射通量就相当于约 683.002lm 的光通量. 这个常数称为**最大光视效能**(maximum lumious efficacy). 它的取值为:

$$K_m = 683.002\text{lm/W}$$

而一个其他波长的单色光源的光视效能就会降低为 $K(\lambda) = V(\lambda) \cdot K_m$. 那么如果一个光源的辐射通量谱分布为:

$$\mathfrak{P} = \int p(\lambda) d\lambda$$

它发出的流明数就可以这样计算得到:

$$\Phi = \int K(\lambda) p(\lambda) d\lambda$$

不同波长的 $K(\lambda)$ 以不同的大小把瓦特换算为流明. 最后光源自己的**光视效能**(lumious efficacy) 就被定义为:

$$K = \frac{\Phi}{\mathfrak{P}}$$

一支一体式荧光灯 (俗称日光灯) 的典型数据为 23W, 1500lm. 而如果使用发光二极管 (LED) 灯, 相同流明数的白光功率需求可以降低一半多, 即达到 200lm/W 左右的能效系数. 黑体辐射则最高只有 95lm/W 左右的能效系数, 在黑体温度约 6500K 时达到极限.

点光源向不同方向发光的情况不一定是均匀的. ...

电子行业的发展使得面光源发光成为照明的主要情形, 任何电子产品的显示界面就是一个面光源. 而我们也关心一个面受到照射的强度情况. 从而就产生了照度和亮度两个新的概念.

18.2 光阑与光瞳

18.3 眼睛

18.4 显微镜

18.5 望远镜

18.6 照相机