

摄影的物理原理

(一)

创洁 编著



目 录

镜头前的物理现象	1
为什么通过镜头能看到自然界的人和物?	1
为什么镜头前的世界是五颜六色的?	3
光与影在摄影中的作用	13
摄影中的物理知识	51
摄影镜头成像中涉及到的基本概念	51
什么叫透镜	62
理想光具组成像的规律	73
联合光具组成像的规律	92
摄影镜头的光阑	121
摄影镜头的景深	139
摄影镜头的光学特性	153

镜头前的物理现象

为什么通过镜头能看到自然界的人和物？

一、为什么通过镜头能看到物体？

朋友，当您翻开影册时，各种画面就映入您的眼帘：巍然屹立的名山，汹涌澎湃的大川，姹紫嫣红的百花，展翅飞翔的雄鹰，乘风破浪的船队，英姿飒爽的国家仪仗队，川流不息的车流人浪……，这些能不令人心旷神怡吗？当您打开自己的相册，看到那些特定时空瞬间记录，能不令人浮想联翩吗？那么，这些多姿多彩的照片是怎样形成的呢？它涉及到多方面的知识，我们只从物理学角度加以简要说明。

我们能看到物体（或通过镜头看到物体）是因为物体能以不同方式反射、折射与吸收投射到它们上面的光。比周围背景能更强烈地反射光的物体，在较暗背景上看来是光亮的；比周围环境反射光线能力较弱的物体，看起来显得暗些。例如，白纸比灰厚纸的反射光强，所以在白纸上的一块灰厚纸看起来好像是灰暗的，而放在黑丝绒上的同一块灰厚纸，看来又好像是光亮的。一个物体，如果其反射光线能力与周围环境相近，那么，从视觉角度看就很难把它从周围环境中区别出来。对透明体而言，是通过它们的透射光看到它们的。如观察一个棱形的玻璃瓶塞子，好像很简单，其实它包含许多复杂的

现象：一部分光被棱面反射，一部分光被磨砂的棱散射，而另一部分光则通过瓶塞发生折射透过。如果把完全透明的物体浸没在媒质里，若物体跟媒质的折射率相同，那么我们就看不到物体了。

光被吸收，其能量就有所损失，转变的能量将使吸收光的物体发热。这有时是需要的，如需要有一黑暗的背景，或消除不合要求的某方向的光，这时就要借助有强大的吸收本领的涂层（如把光学仪器内某些表面涂上黑色）。物体反射、折射和吸收光的程度通常用反射参数、折射系数和吸收系数表示：反射系数 = 反射光强度 / 入射光强度；折射系数 = 折射光强度 / 入射光强度。根据能量守恒原理，三者之和恒等于 1。当光照射某一物体时，若反射系数大，说明反射光强度大，而被折射和吸收的光都很弱。这些系数通常跟光的颜色（波长）有关。

来自物体（或通过镜头）的光若被眼睛接收，我们就看到了物体；若被胶片所接收，就获得了潜影，再经过光化处理，便可得到五彩缤纷的生活照。同理，工业、医疗、军事、航测科研等领域都可以得到各自的专业照片。

正常人眼能够看到大千世界的人和物，是由于来自外界物体的光线成像在视网膜上。某一物体在可见光的照射下，由于物体的反射、折射和吸收特性，使光的能量在空间的分布、功率大小以及光谱组成等方面都有所改变。物体各点发光强弱是不同的，对人眼视网膜上的锥体和柱体（杆体）细胞的刺激程度就不同。因而这些细胞产生的神经兴奋程度也不同，这种兴奋再传到脑，人们就看到物体表面明暗差别和整体形象。

二、物体在视网膜上的像原本是倒立的，为什么看

到的却是正立的？

为了寻找答案，心理学家曾做过下列试验：他戴上一副特制的眼镜，这眼镜的光学系统，能使外界物体在视网膜上形成正立的实像：那像的上部落到视网膜上部，像的左侧落到视网膜左侧……但心理学家看到的视场却是颠倒的，一切东西都倒转了。开始特别不习惯，视觉跟触摸觉和动觉之间常乱套。他用手摸物体、在空间行动都发生困难：想拿上面的物体，手却常伸到下面；想拿右面的物体又常常把手伸到左面。但他力求使自己的行动符合客观实际，在一星期后，视觉逐渐与触觉、动觉协调起来，行动错误减少了。到 21 天后，他的行动又自如了，完全能适应这种新的空间关系，他看到的景物都正过来，周围的一切都恢复正常了。但取掉眼镜之后，又出现了整个环境倒转现象，再过几天才能恢复正常。由上述实验可知：人们观察到的事物不是由视网膜上的像唯一确定的，人在认识外界时，各种感觉器官（视觉、触觉、运动觉）作为一个统一主体协同活动、相互验证，通过实践活动，最后才能正确反映客观现实。其实看东西时物是正立的，视网膜上的像一定是倒的。

为什么镜头前的世界是五颜六色的？

很早就有许多人对颜色问题进行了探讨，曾消耗了不少人的才智。一些科学家曾作过无数次观察，有日常生活方面的，也有科学研究方面的，但直到牛顿对这问题研究以前一直没有定论。曾经有人认为，颜色是物体本身的一种性质。但经过仔细观察后发现，物体的颜色随一天内的不同时刻或不同照明状况而有显著变化。有

人说物体的颜色是光亮与黑暗的“混合物”，这都是不对的。直到牛顿通过实验才揭示了颜色问题的本质。现在人们已经知道物体的颜色除了跟物体本身的特性(反射、折射和吸收)和光的特性(波长或频率)这些客观因素有关外，还跟人的主观因素密切相关。故此涉及到生理光学(包括眼的视觉、色觉和幻觉等)光度学(各种光量)，色度学(主要研究颜色测量和颜色视觉规律)等各方面知识。

一、为什么白光能分解出七种色光来？

牛顿通过如图 1 - 1 所示的装置就可以把白光分解出七色光。使一束平行的白光通过一个狭缝 S 射到三棱镜上，光通过棱镜后，能在棱镜后方的屏上形成相当宽的一条具有各种鲜明颜色的带。这条光带的一端是红色，另一端是紫色，中间依次排列着橙、黄、绿、蓝、靛各种颜色。各种颜色是随光的波长连续变化的，因此，各种颜色的分界线带有人为约定的性质。把白光(复色光)分解成单色光的现象叫色散。由色散形成的色光按一定次序排列的光带，叫做光谱。每一种单色光都对应着一定的波长(实际是一小波段)如表 1 - 1 所示。(在紫色外有不可见的紫外线，在红色之外有不可见的红外线。)而这些光都不能再分解了，它们叫做单色光。如果令这些单色光会聚又可得到白光(叫光的复合)。

表 1 - 1 (波长单位为 nm)

光谱区域	波长	光谱区域	波长
紫	400 ~ 450	黄	570 ~ 590
蓝	450 ~ 490	橙	590 ~ 610
靛	490 - 501	红	610 - 700
绿	501 - 570		

二、物体的颜色是由什么决定的？

1. 光的颜色是由什么决定的？

光的颜色是由光的波长（或频率）来决定的，每种单色光都有各自的频率。如 400 ~ 500nm 蓝色光，500 ~ 600nm 绿色光，600 ~ 700nm 红色光。

2. 透明体的颜色是由什么决定的？

透明体的颜色是由它折射（即透射的）光的颜色决定。例如红色玻璃，对红光折射系数很大，对其它光的吸收系数也很大。所以，红光发生折射而其它光大部分被吸收；而无色透明体，它对各种单色光的折射都同样的强（折射系数都很大），而吸收系数都很小，因此，各种色光都能透过物体，此种物体便是无色透明体。

3. 非透明体的颜色是由什么决定的？

反光物体的颜色是由其所反射光的颜色决定的。白色物体，是对各种色光的反射系数都同样大，而吸收系数和折射系数都很小，因为它反射了所有色光而成白色（叫白体）；黑体，是完全吸收照射光的物体；一般黑色物体，是指在入射白光的各波长中，能均匀吸收各种单色光极大部分能量的物体；中性灰色物体，是对各单色光吸收的部分小于反射的部分，也就是介于黑体和白体之间的物体。物体的颜色通常是指在白光照射下所呈现的颜色。如红色物体在白光照射下只反射红光而吸收所有其它色光；如果一个物体反射一种光，折射另一种光而吸收其余的光，那么就会从反射光中看到一种颜色，而从折射光中看到另一种颜色。例如叶绿素的酒精溶液（酒精提出物），它只反射绿光，折射红光而吸收其余光，从反射光中看到它是绿色的，从折射光中却看到它是红色的。总之，发光物体的颜色是由所发出光的颜色所决

定；反光物体的颜色是由所反射光的颜色决定；透光物体的颜色是由所透射光的颜色所决定。

三、彩色的三要素是什么？

颜色可分彩色和非彩色两大类，这两类的总称叫颜色。非彩色指的是白色，黑色和各种深浅不同的灰色。彩色是指黑白系列以外的颜色。彩色要用三要素（特性）来描述才能表述人眼对不同颜色的感觉，只从各种色光的波长不同来区分那是不完全的，还应同时采用色调（色别或色相）、饱和度和亮度（明度）等来加以区分。

色调决定于物体反射（或折射）光的波长，是颜色质方面的特征；饱和度决定于反射（或折射）光中所混入白色的数量，物体颜色中纯光谱色的含量愈多，饱和度愈高；亮度决定于反射或折射光的强度，可理解为反射（或折射）光引起视觉刺激的程度，是物体颜色在“量”方面的特征。色调和饱和度合称为“色品”，是颜色的色度学特征。

四、人眼的视觉对光的灵敏度有什么规律？

人的视觉器官在发展史上是从动物眼睛发展进化而来的。在漫长的进化过程中，由于对太阳光线物理特性的适应，形成了人的视觉器官的特殊结构；复杂构造的眼球以及视网膜上的锥体细胞和柱形（或杆形）细胞。

视觉的光化理论指出，人类和动物的视觉跟一些光化学变化有关。在光的作用下，视网膜内的一些特殊物质（视紫素）就发生分解；分解物刺激了视神经而产生光的感觉。因为视神经有许多分支，散布在视网膜表面上，所以刺激的性质就依这种光化分解发生在视网膜上的什么地方和达到什么程度而定。

在单位时间内被分解的光敏质（视紫素）的量决定了对光感觉的强弱。眼睛对光有很强的适应本领，可通过下述方法实现：眼睛可以通过改变瞳孔的直径即改变瞳孔的面积，使视网膜上的照度在 20 倍的范围内变化；眼内有不透明色素（一种染色质，能大量吸收光），在光的作用下这种色素移动到感光膜前面，保护感光膜使它不受太强光的刺激，当光较弱时，它就移走，让感光细胞暴露出来；通过圆锥或圆柱两种细胞的不同作用来适应光强弱不同的外界环境。

圆锥细胞数目可达七百万，绝大部分分布在视网膜中部，相对而言它对光的感觉不太敏感，只在光较强时才能感觉到光，同时能辨别颜色和分辨物体的详情细节。它叫白日（或亮）视觉。颜色视觉的三色理论认为圆锥细胞（或每个圆锥细胞里）有三种机构，它们分别对绿、红和蓝敏感，当三种颜色作各种不同组合时，就可产生各种颜色的感觉。人眼对可见光中不同波长的光敏感度并不相同：在明亮条件下对黄、绿光敏感度最高，对红和紫光敏感度最低；在阴暗条件下对绿光敏感度最高，对红和紫光的敏感度还是最低。圆柱细胞对光特别敏感，在微弱的光照下起主要的视觉作用，所以它也叫暮曙（或暗）视觉。圆柱细胞的数目超过一亿，分布在视网膜的外围，它对光的敏感度比圆锥细胞大得多，但分辨颜色的本领却差得多。它对各种波长的光敏感度虽不相同，但其极大值在波长较短的区域，所以在光很弱时，主要起视觉作用的是圆柱细胞，各种波长的光引起同一种蓝灰色的感觉。

通常是两种感光细胞在不同程度上都同时起作用：在光较强时圆锥细胞起主要作用；在光较弱时圆柱细胞

起主要作用。例如，在强烈的照明情况下，看到的红的色调比蓝的色调亮，而在同样的光谱成分的光束作微弱的照明时，看起来倒觉得蓝的色调比红的色调亮。这主要因为两种细胞对色调的敏感度不同：前者是白日视觉在起主要作用，它对红光的灵敏度高；而后者是暮曙视觉起主要作用，而它对蓝色最敏感。

五、什么叫加色效应？什么叫减色效应？在摄影中是怎样复现的？

（一）加色效应与减色效应

1. 加色效应：两种以上色光同时进入人眼，刺激视网膜锥体细胞，可使大脑获得另外一种色调的色觉。这种由两种以上色光彼此叠加后所产生的综合色觉效果叫做光的加色效应。加色效应的理论依据是颜色混合定律。1854年格拉斯曼（H·Grossmarm）将颜色混合现象总结成颜色混合定律：

人的视觉只能分辨颜色的三种变化：色调、亮度和饱和度；

在由两个成分组成的混合色中，如其中一个成分连续变化，混合色的外貌也随之连续变化。由此可导出下列二定律：

a) 补色定律：每一种颜色都有一个相应的补色。如果某颜色与其补色以适当比例混合，便产生白色或灰色（如红与青、蓝与黄、绿与品红）；若两者按其它比例混合，便产生近似比重大的颜色成分的非饱和色。

b) 中间色定律：任何两个补色相混合便产生中间色，其色调决定于两颜色的相对数量，其饱和度决定于二者在色调顺序上的远近。

颜色外貌相同的光，不管它们的光谱组成是否一

样，在颜色混合中具有相同效果。

混合色的总亮度等于组成混合色的各颜色光的亮度的总和(也叫亮度相加定律)。以上定律只适用各种色光的相加混合，不适用于染料或涂料的混合(它们属于后面讲的减色效应)。

摄影者在拍摄彩照时，必须考虑加色效应对摄影画面的影响，如绿草地上或绿树丛中的人(或物)常常带有绿色调；红色(如红墙或红旗等)背景下的人常带淡红色调；蓝色天空下的海水显得更蓝，而阴暗天色下的海水却显得灰蒙蒙……。上述情况有时可以加以利用，更多的情况下则需要克服，可用其相应的补色加以中和。

2. 加色效应中的三原色为：红(R)，绿(G)，蓝(b)。若三原色按不同比例叠加混合，理论上说这种混合可模拟出自然界中的各种颜色，包括黑白系列的各种灰色和各种色调和饱和度的颜色及可见光谱的全部颜色。实际上，这种混合是不能配出自然界所有的一切颜色的。

不同的颜色刺激同时作用到视网膜邻近的部位，也能产生颜色混合效应。如彩电荧光屏上，密集地布满小的红、绿和蓝的发光荧光粉条或粉点，它们刺激视网膜非常邻近的锥体细胞，以致视觉不能区分独立的粉条或粉点。通过调节屏幕上相邻的三色粉条或粉点的亮度比例，就在视觉上产生各种颜色的混合效果。

三原色不只是红、绿和蓝三色，也可以是其它三种颜色。条件是三原色中的任何一个不能由其余两个相加混合获得。不过经证明红、绿和蓝是最优三原色。红、绿和蓝的互补色分别为：青(C)，品红(M)，黄(Y)。能配成白光的两种颜色称为互补色。加色效应如图 1 - 2 所示。

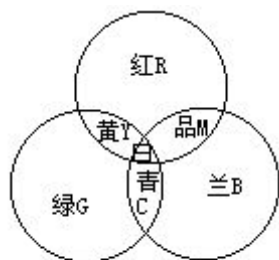


图1-2

3. 减色效应：从含有多种色光的复杂可见光（如白光）中，减去若干单色光，获得另外一种光的效应叫减色效应。减法混合的原理比加法混合原理复杂，两者的混合过程及结果都不同。如根据颜色相加原理，将两束白光分别通过蓝滤色片和黄滤色片，投射到屏幕上进行相加混合，由于蓝光和黄光是互补色，得到的合成光是白色。但在蓝滤色片和黄滤色片的减法混合中（如让白光先后通过蓝滤色片和黄滤色片的光即为减法合成光），混合色不是白色而是绿色，即加色效应是不同比例原色光直接相加混合，而减色效应是从复合光中减去几种不同比例的原色光而得各种色彩。

在颜色相加混合中是通过控制三原色（红、绿和蓝）来获得最多的混合色。那么在减法混合中想什么办法也能通过控制红、绿和蓝来获得较多的混合色呢？为此，在减法混合过程中应用了三个“减法”原色——即红、绿及蓝的补色。调节三种补色来控制绿、红、蓝。三个“减法”原色分别为：青“减法”原色，也叫“减红”原色，因为它印在白纸上，由白光照射时呈现蓝绿色称青色，是控制红色用的；“减绿”原色——品红“减法”原色，印在白纸上白光照射下呈红紫色（品红），是控制绿色用的；“减蓝”原色（即黄色“减法”原色）印在白纸上在白光照射下呈黄色，是控制蓝色用的。

光的减法混合应用很广：染料涂料、彩色印刷、彩色摄影等。减法三原色是通过什么来控制或减掉三原色（红、绿、蓝）的呢？是通过减法原色材料密度的变化来实现的。当各减法原色材料密度大时将吸收较多的红、绿、蓝成份；密度小时，则能透过较多的红、绿、蓝成分，从而通过控制红、绿、蓝成分多少而获得更多的减法混合色。图 1 - 3 是减色效应示意图。

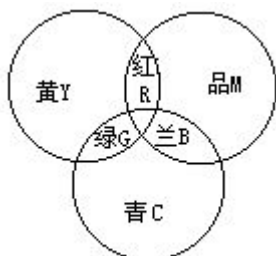
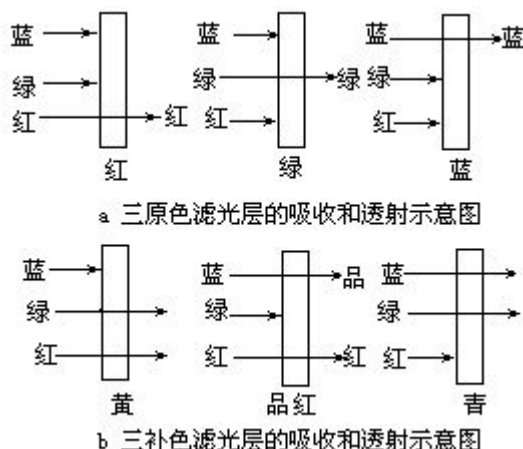


图1-3

（二）加色效应及减色效应在摄影中的复现

彩色摄影是根据三原色原理，对被拍摄物体进行颜色分解和合成两个步骤来得到原物的彩色影象。分解的方法是将物体的颜色分解成红、绿、蓝三原色分别记录在胶片的不同感光层上。合成的方法可以采用加色法（如图 1 - 2 所示的三原色的不同组合）；也可以采用减色法（三减法原色的不同组合如图 1 - 3 所示）。三原色滤光层及三减法原色（三补色）滤光层，对色光的吸收和透射情况是不同的，前者只能透过本色光，吸收其它色光；后者吸收与其互补的原色光，透过本色光或构成本补色光的两种原色光。上述两种情况如图 1 - 4(a)、(b)所示：



1. 加色法复现彩色照片的主要过程：用色密度较大的红、绿、蓝色滤色片，通过负片对彩色相纸进行三次曝光，每一次曝光，仅是彩色底片上的补色负象的一部分，使彩色相纸上的一层乳剂膜受感（一种单色正象在相纸上形成）。具体情况：白光（或近似于白光）通过红滤色片时，彩色相纸的显青色层就感受透到底片的红色光线；当白光通过绿滤色片时，彩色相纸的显品红色层就感受透到底片的绿色光线；当白光通过蓝色滤色片时，彩色相纸的显黄色层就感受透到底片的蓝色光线。通过上述三次曝光，底片上的三层补色负像即可在彩色相纸上全部还原。因为加色法复现彩色照片的程序比较复杂，目前很少用。

2. 近代彩色摄影大部分采用减色法。为了记录自然界的人和物的各种颜色，在胶片的片基上涂有三层不同感色性能的乳剂膜层，来记录三原色（红、绿、蓝）。三乳剂层分别含有各自补色的成色剂。上层感蓝色光，含有黄色成色剂；中层感绿色光，含有品红色成色剂；下层感红色光，含青色成色剂。在上、中两层间涂有黄色药膜，用来阻止蓝色透过，因中下层也感蓝光，这层黄

色药膜在冲洗时便自行消退。当彩色负片曝光显影以后，便可形成三原色的补色影像层。感蓝光的上层形成黄色影像层。感绿光的中层形成品红影像层；感红色光的下层形成青色影像层。白光通过彩色及负片上的黄、品红、青三个补色影像层时，三者分别成为“减兰”、“减绿”、“减红”原色的作用，使被摄物体的颜色转变为其补色，故而看到彩色负片上的颜色都是与原物相反的补色。在晒印时，因为正片或相纸跟负片的制造原理相同，因此当白光通过负片补色影像对它们一次曝光后，再经冲洗便可还原物体的颜色。

光与影在摄影中的作用

一、为什么到了夜间自然界的颜色就消失了？

我们通过镜头看到自然界中五颜六色的物体，是因为眼睛接收了通过镜头来自物体发射、反射、散射或折射的光。而大多数物体是不发光的，在夜间便没有阳光供其反射或折射，当然我们就看不到五颜六色的物体。人类在跟黑暗的斗争中，创造出多种人造光源战胜了黑夜，即在夜间也可以象白天一样的生活、工作和摄影。

二、光度学中常用的物理量有哪些？

人类在同黑暗的斗争中创造了多种光源，任何光源都涉及到对其辐射能的量度问题。在光学中与能量有关的量有两类：一类叫辐射度学量，如辐射能、辐射通量、辐射强度、辐射亮度、辐射照度等，它表示辐射能的大小；另一类是生理的收做光度学量，它表示人眼对辐射能的视觉强度，有时两者没有必要加以区别。

1. 光通量（即光流）

光通量表示光源表面的客观辐射通量对人眼所起的视觉强度，它等于辐射通量与视见函数的乘积，光通量的单位为“流明”。不计相对视见率的辐射通量单位为“瓦特”。“流明” \times 发光强度为 1 烛光的点光源在单位立体角（1 球面度）内发出的光通量。

2. 发光强度

发光强度是表示光源在一定方向范围内发出的可见光辐射强弱的物理量，单位为“烛光”。如不包括相对视见率时，光源的辐射强度是单位立体角中全部辐射通量，单位为瓦特/球面弧度。相对视见率又叫“视见函数”。不同波长的光对人眼的视觉灵敏度不同。一般说，人眼对黄绿光最灵敏；对红光和紫光都不灵敏；而对红外光和

紫外光，则无视觉反应。所以人眼对波长为 5550 \AA 黄绿光的视见率为最大，取为 1；其他波长的可见光的视见率均小于 1；红外光与紫外

光的视见率等于零。某波长光的视见率与波长为 5550 \AA 的黄绿光视见率的比称为该波长的相对视见率。在不同条件下，视觉灵敏度是不同的，上述视见率是指白日视觉（亮视觉）的情况下。暮曙（暗）视觉则不同。两者的区别如图 1-5 所示的明视觉和暗视觉的视见函数曲线可见，图中横坐标是波长，单位为纳米（nm），纵坐标为视见率（相对视见率）。

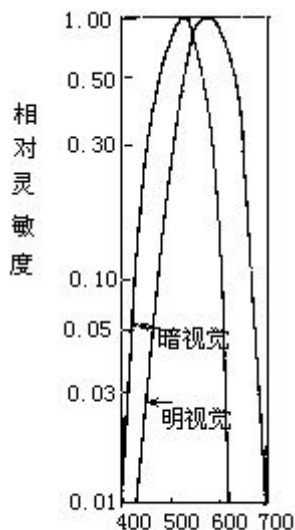


图1-5

3. 照度

物体单位面积上所得到的光通量,其单位为勒克司。

4. 亮度

亮度表示发光面发光强度并与发光面特性有关的物理量,可以用单位面积的光源表面在法线方向单位立体角内传送出的光通量数值来量度。

三、什么叫光源?光源的种类有哪些?

在物理学中,将能够发光的一切物体都叫光源。任何发光物体的发光过程都是电磁波的辐射过程。从不同角度把光源可分为:自然光源和人造光源;热辐射光源和非热辐射光源;普通光源和激光光源;热光源、气体放电光源、固体光源、自然光源和激光光源等。了解了光源,就能掌握摄影的主动权。为适应日常生活、生产和各种科学技术及摄影等方面的需要,必须有各种不同光学性质和结构特点的光源。在成份分析、结构研究、检验测量等方面光源都是必不可少的,同时在很多情况下,常起着关键性的作用。在摄影技术中,光源显得更