

第一章 引 论

第一节 光、眼睛和看

我们这颗行星上的一切生命都置身于能量之波的沐浴之中，这种能量之波是生命赖以存活的依托，也是生命与生存环境之间相互沟通、相互作用和交流的媒介。光和声便是天地之间的两种最基本的能量之波。光是电磁波，来源于物质内部微观结构水平上的运动；声是机械波，来源于物质宏观形式整体的运动。波是一种交变往复形式的运动，科学家将这种形式的运动称之为振荡或振动，电磁波是电磁场强度的振荡，声波则是机械力和运动强度上的振荡。波的另一个特点是它具有传播性，一点上的振动会牵连到与它邻接的物质也发生振动，于是这种交变往复的运动形式便会向四周传播开来。波的传播现象是屡见不鲜的，当你站在湖边向平静的湖面抛去一粒石子时，石子击中水面产生的水波便会围绕击中的那一点向周围扩散开来，形成一圈一圈的同心圆水波由近及远地传遍整个湖面。这时如果湖面上有一茎出水的苇草，当水波波及到它时，这根苇草便会受到频频传来的水波的影响而摇曳起来。这显示出了能量之波的第三个特性，它会使得任何一种置身于其中的物体发生感应，无论是有生命的物体还是无生命的物体，是有意识的感应还是无意识的感应，总之，任何东西置身于能量之波都不可能“无动于衷”。而生命正是以积极的姿态感应这充满天地间的能量之波才得以存在，才成其为生命，也才有生命及生物的进化、发展，以至于在这寂寥的宇宙之中产生出地球人类的智能、意识和文化这些大自然造化的最高成果来。

全世界的各种古老文化，尤其是在神话和原始宗教方面，几乎毫不例外地都是以对光的崇拜拉开序幕的，而光也就是太阳。人类的祖先，无论是哪一种文化的开辟者，一旦睁开了智慧之眼，他的自我意识驱使他要问的第一个问题便是，“我是谁？我在哪里？我和这世界是从何而来的？”而世界各民族从上古史流传或记载下来的关于创世的传说，首先都是作为光的创造而出现的——世界的开端就是光的来临。在埃及神话中，光的地位非常重要，天与地的分开（用中国文化的语言，就是“开天辟地”）都是光干预的结果。《圣经》（旧约）开篇的《创世纪》作为希伯来人上古史传说的典籍，相传是摩西的著作。上帝创世在第一天里要作的事便是开创光明，“神说：‘有光！’就有了光。神看光是美好的。便把光、暗分开”。中国的创世神话虽成文较晚，但关于盘古王开天辟地的神话也涉及到了太阳，三国时徐整的《五运历年记》算是最早的成文记述：“首生盘古，垂死化身，气成风云，声为雷霆。左眼为日，右眼为月，……”，“天地开辟，阳清为天，阴浊为地；……”。这一传说值得注意的是将光与眼睛连系了起来。无独有偶，在这种联系上东西方文化竟如此遥相呼应，不谋而合。从埃及古王国时期的第一王朝开始，古埃及人便普遍崇拜宇宙之神荷努斯（Horus），它的形象是一支鹰隼，它的右眼为日，称为“太阳神瑞（Ra, Re）之眼”，左眼为月，称为“荷努斯之眼”，在古埃及文物和艺术中，这种象征太阳的符号随处可见（见图 1-1）。非常值得注意的是，古埃



图 1-1 古埃及文化中各种象征阳光的符号

及人将太阳和眼睛视为一体的观念，古埃及文化之美的根本特征也就在于此，是“太阳神的光芒创造了一切生灵的眼睛”，太阳之眼（Wedjat eye）的灿烂光芒雕刻了幽暗的群山和岩石，塑造了古埃及人的宇宙和心中的偶像，如同太阳，眼睛创造出了这个五彩缤纷的世界。古埃及多神教中崇拜光和太阳的观念带有很浓厚的泛神论思想，这种崇拜实际上来源于对太阳光的自力的敬畏，到法老阿赫那顿（Akhnaton），即第十八王朝法老阿蒙霍特普四世（Amenhotep IV），约前 1379—前 1362）实行一神教改革的时代，太阳神阿顿（Aton）便成了唯一允许敬拜的神灵，并剔除掉了过去那些加在太阳神上的杂多的偶像成分，还太阳神一个自然的形象（见图 1-2），那时留下的太阳神阿顿就是个圆形的日轮和无数辐照大地，抚卫苍生的光线，每条光线的下端都是一只施予下界的手。在这位哲人般的法老心中，太阳就是上帝，上帝便成了一个人人都能看到和认识到的事实，它以同样的慷慨向万物洒下阳光和生命。在他写给太阳神的《阿顿颂诗》中，他唱道：“生命的太阳，你以何等地壮美自天边升起，你是万物创生之太初，你从东方的地平线上发出照耀，让大地充满美色；你美丽，光明而伟大，用你那阳和之光怀抱你所创造的万物和无垠的大地；你虽如此之遥远，你的光却洒到了整个大地上……”由此可见，与其说人是生活在宗教神力的范围内，不如说是生活在太阳光这种自然力的范围之内。太阳能够普照与纵观万物，阿顿作为神灵，它便是太阳的眼睛，太阳也是上帝的眼睛，它既可以观看，也可以被观看。人们常把眼睛与太阳和光紧密联系在一起，其文化渊源是相当深远的。

在欧洲，中世纪的学者们对光的本性有了更深刻的认识，当时最有学问的神学家圣·托马斯·阿奎那（Saint Thomas Aquinas，约 1225—1275）把光与美的关系提升到了神圣的境界，他把光和鲜明的颜色作为美的三要素之一，又把鲜明的颜色看成是美作为光的最单纯的表现。阿奎那认为，美的光就是事物形式的光，光可以使事物的形式在人们的头脑中充分地显示出它的完善和秩序来。他的这些观点都是具有科学性的，但阿奎那的认识尚不止于此，作为一个神学家，在他的心目中的光还不完全是物理的光，还

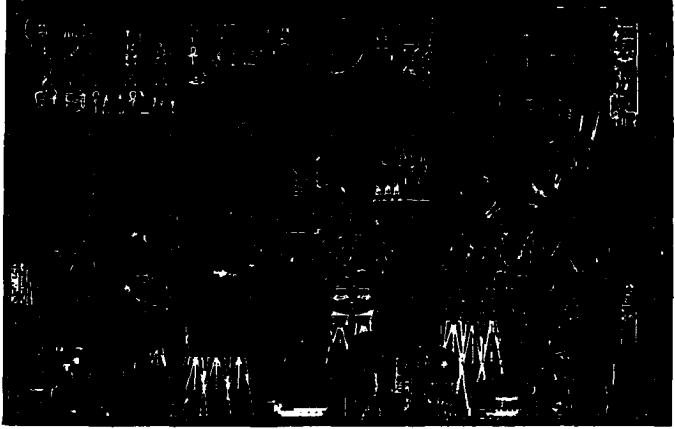


图 1-2 阿赫那顿与王后和女儿在礼拜日轮阿顿

更有其神秘的一层含义。这是一种比太阳还要鲜明的光，是上帝之光，只有这种光，才是灌注生气的东西。因此，那时的学者们认为：光是各种事物中最美、最高贵、最完善的。光是视力的创造者，只是有了光，才诱发出了我们的种种感觉。光，作为上帝之光，它能显现和创造大千世界，上苍通过它来滋养万物，给人以温暖和食物。我们对周围世界的知觉与感悟，也取决于光对我们心灵的照射，美对知觉的直接性，也就取决于事物在光线照射下的明确性了。中国的汉字造得很好，表达聪明和智慧这些概念的语言文字中，耳、目、日、月和心都包括齐了，东西方文化在这上面的认识该说是有共通之处的。

中国古人有云：“耳闻之成声，目遇之成色。”仰观俯察，游目聘怀，以极视听之娱，其实就是人类感观对那两种基本形式的能量之波的感应，光来自于上苍，使视见这一感应带上了悠久的宗教虔诚色彩，声发源于万籁，则不似光那般神秘诚恐。现在我们回到科学这个现实境界来认识一下“看”和“听”这两种感官响应。眼睛能看见的光只是充满宇宙的电磁波（或电磁辐射）谱上介于紫外和红外辐射之间的一个非常狭窄的谱段，这就是可见光。电磁波波长的范围极宽，从以千米为单位的交流输电（1000 m 以上波长）的电磁波，至 $10^{-12} \sim 10^{-15} \text{m}$ 的核辐射和宇宙射线，人眼所能看见的可见光电磁波的波长范围只在 $380 \times 10^{-9} \sim 730 \times 10^{-9} \text{m}$ （即 380 nm （ $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ） $\sim 730 \text{ nm}$ ，或 $3800 \sim 7300 \text{ \AA}$ ）之间。在如此宽广（ 10^{18} 数量级范围）的电磁波谱中，人眼的视觉细胞只对这个狭窄范围的波段产生视感应（见图 1-3 与表 1-1）。可见光谱段范围以外的电磁波也会对人体细胞产生作用，但不会引起视觉，例如，可见光长波端以外的红外线能使人体产生热感这种皮肤觉感应；短波端以外的电磁辐射则会对人体细胞造成不同程度的伤害。例如，紫外线能使皮肤产生色素沉着，甚至灼伤皮肤，杀死上皮细胞； X

射线能杀死正在分裂的细胞； γ 射线和 α 射线则是核爆炸辐射杀伤力的主要成分。这个从很短的宇宙射线与 γ 射线到很长的无线电波范围内的连续电磁辐射谱，各辐射区所给的名称只是为了方便和纯属技术应用的历史背景方面的原因，各段波谱的物理本质是完全一样的，各波谱段上的电磁辐射便是以下种种事物现象的基础：无线电和电视发射与收听、收视，X射线医学检查，微波加热等。至于可见光这个极其狭窄谱段的意义，已如前所述，在这里应强调，它提供了色谱，是我们赖以视觉传达、从事配色与创造视觉艺术和审美的基础。

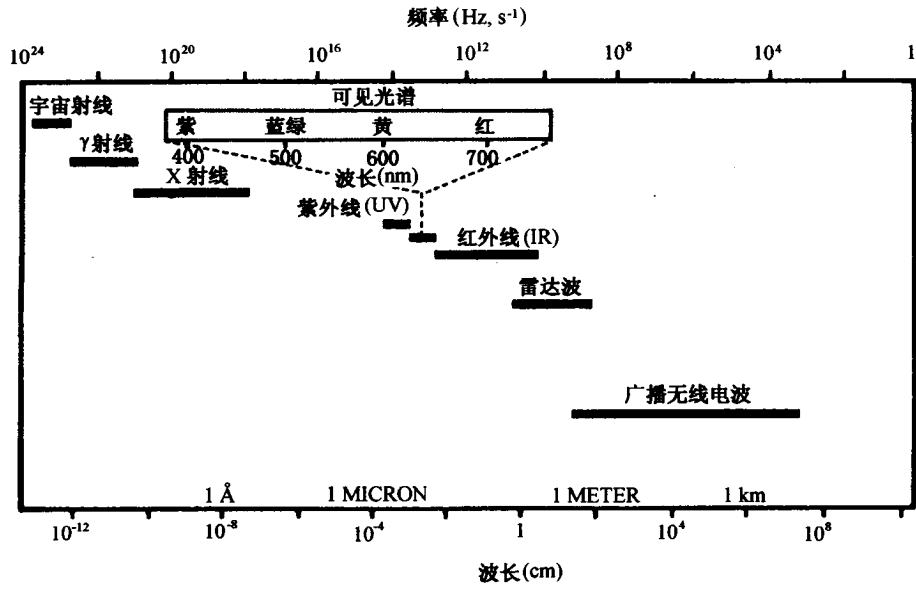


图 1-3 可见光谱段与电磁波谱

表 1-1 电磁辐射源

谱 段	波长范围,m	辐 射 源
宇宙射线	$< 10^{-13}$	来自外层空间
γ 射线	$10^{-13} \sim 10^{-9}$	放射性原子核裂、聚变产生
X射线	$10^{-11} \sim 10^{-8}$	电子冲击重金属靶原子产生
紫外线(UV)	$10^{-8} \sim 10^{-7}$	电弧,气体放电和极热的物体产生
可见光	$4 \times 10^{-7} \sim 7 \times 10^{-7}$	从炽热气体、液体或固体的分子运动产生
红外线(IR)	$7 \times 10^{-7} \sim 10^{-3}$	与可见光同源
微波	$3 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-1}$	电导体电子前后运动产生
无线电波:		电磁振荡线路
超高频	0.01 ~ 0.1	
甚高频	0.1 ~ *1.0	
高频	1.0 ~ 10	
中频	10 ~ 10^3	
低频	$10^3 \sim 10^4$	
甚低频	$> 10^4$	

人耳能听见声音的机械波，其频率在 20~20000 Hz 之间，超出这个范围以外的次

声波（低频端）和超声波（高频端），人耳也是听不见的。当然，这本书是关于眼睛和看的，听觉和声波的引述主要是作为人类另一个重要的信息接受渠道，在有比较价值时才提到它。

从物种上看，人类现在所处的自然环境，是自恐龙灭绝之后大约经历了一亿年的进化过程形成的。在这个历程中，我们的视觉器官及其视觉功能也是经历了大约七千多万年（从新生代起）进化的产物。除了人类之外，动物界也产生出了视觉功能各不相同的形形色色的眼睛。出于感知环境这种生存需要，地球上的绝大多数生命形式都进化出了探知光的本领。在许多单细胞生物中便有感光部位存在，有许多低等生物又存在着专门可探测光线的细胞，循着探测光线功能进化的线索，可以在动物界找出一系列由低级向高级发展的物种例证，这种功能逐渐沿着将感光细胞集中在某个体位的方向发展，从简单地探知光暗的本领向看清环境和物体形象及其运动这种真正的视觉功能进化，便产生出了两类在动物界高度进化的眼睛，一种是以人眼为代表的大多数脊椎动物（也包括一些非脊椎动物，例如章鱼）所具有的那种照相机似的单眼（其实应该把照相机当成一种最普及的仿生机器，把它称之为“眼睛似的视觉记录仪”）；另一种是昆虫所具有的由众多小眼睛集合在一块形成的复眼（图 1-4 说明眼的进化和这两类高度进化的眼睛的特性）。自然界的形形色色的眼睛都在以自己特有的方式看世界，从人类自己的视觉经验来判断，我们会发现有些动物看的本领比我们人类还高明。而有些动物的视觉本领我们

单眼的进化历程：

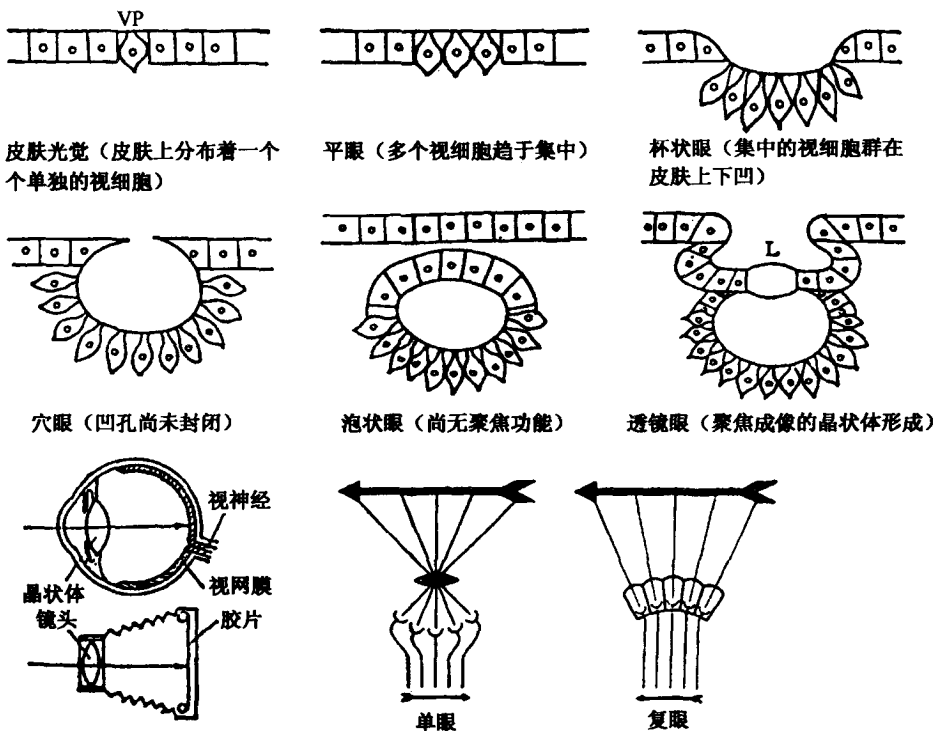


图 1-4 眼的进化和两类高度进化的眼睛

会觉得低级得可怜，要是把它们眼睛换到我们人类身上，那简直是比瞎子好不了多少。但是从生物的感官功能适应环境的生存需要来看，各种类型的眼睛在其视觉功能及其构造上，大自然都把它设计得如此精妙，对于那种物种说来正是不多不少，恰到好处，如此符合经济的原则。表 1-2 中列出了一些有趣的示例。当然，我们最感兴趣的还是人类自己的眼睛。它的构造，它的看的技巧和本领，以及它的看的艺术。对动物来说，看仅仅是眼睛的视见本领，对于人类就不止于此，看，还是一种艺术。

人们常把自己的眼睛称为灵魂的窗户，无论从一个个人眼里透露出的内心秘密，还是人心通过这扇窗户洞悉身外的世界而言，这一比喻都是意味深长的。因此，人们在通过眼睛对外界发生兴趣的同时，也对人自己的这个绝妙的感觉器官充满了好奇心。从古到今都有不少人对眼球的构造和作用进行过探索和猜测，图 1-5 是这种探索的三个历史示例。图中之 (a) 是阿拉伯人对眼球构造的认识，欧美文献认为这是世界上最古老的记载；(b) 是文艺复兴绘画大师列奥纳多·达·芬奇对眼球构造及其作用的想像；(c) 是

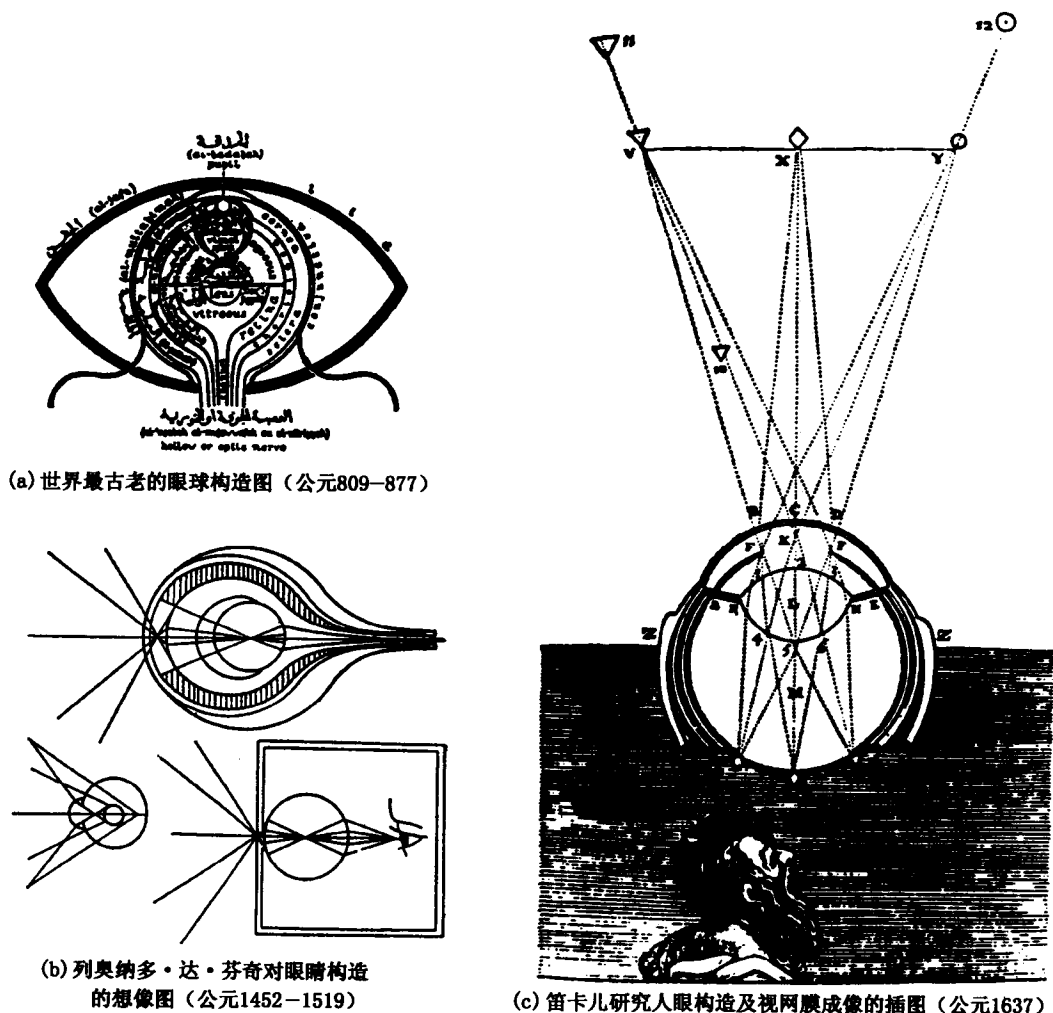


图 1-5 人类对眼睛构造认识的历史记载

法国数学家和哲学家笛卡儿解剖牛眼后得到的对人眼结构的认识，据说，视网膜（retina）也是他发现并命名的。今天，发达的科学技术使我们眼球的构造和作用的了解和认识已相当深入。读者在本书以后各章将会对此有所了解。图 1-6 是根据现代解剖学知识绘制的眼球结构简图。图 1-7 则用图解的形式说明人类视觉系统及视见功能全过程的生理物理学模式。

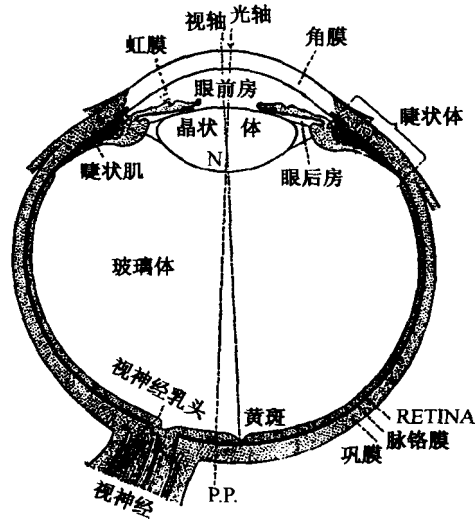


图 1-6 人眼的解剖构造

从视见过程的生理 / 物理学描述（图 1-7）可见，视觉最终是在人脑的视觉中枢内完成的，就其所处的部位而言，从眼睛接受到的视觉信号是被送到人头部的后脑勺里面才被看见的。自文艺复兴以来的 500 多年里，西方艺术家一直对视觉的科学抱有浓厚的兴趣。最初，他们将中世纪累积起来的光

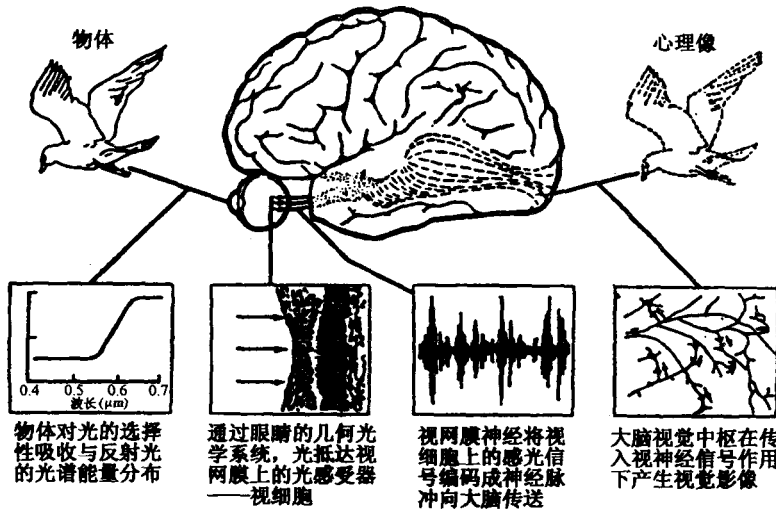


图 1-7 人类视觉系统及视见过程模式

学知识和理论用于绘画构图。许多文艺复兴时期的艺术大师都花了相当多的思考和实践致力于眼球几何光学体系的探索。总结出线透视图则这个重要的空间知觉线索，从而为他们在平面图画上再现视觉的空间真实性奠定了坚实的基础。后来又结合色彩科学方面的发现以及色彩视知觉现象的深入了解，使欧洲的现实主义和自然主义绘画观念不断发展和嬗变，从达·芬奇、丢勒到崇信实证主义哲学的库尔贝和主观现实主义的印象派画家，我们都可以看到他们在其艺术实践和美的追求中是具有何等真切的科学精神。也可以从他们的艺术实践和作品中看到他们是多么执着于对看这门艺术的探索 and 追求。达·芬奇堪称为一位旷世奇才，在他身后的几个世纪里，科学家和艺术家集于一身只是一种

偶然的反常现象，然而，艺术想像和逻辑理性彼此抵触之说似乎对他失去了效力，并且这种理智上的均衡被这位历史人物完善得尽善尽美，即使在他那个时代，人们也将他看作是一个不可思议的对象，就像是科学和艺术杂交出的怪人。从他留给后世的艺术杰作里所包含的精确的解剖结构，严格的透视关系和细微真实的光影色调，可以推知这位巨匠是以多么富有思索力的眼光在观察周围的世界。他所留下的五千多页手稿和速写插图，更可见在他头上长着的那一双眼球把看的艺术和科学已提升到了前不见古人后不见来者的地步。像达·芬奇这样的人是罕见的，但在艺术史和人类审美经验探索的历史长河中，看的艺术，艺术地看以及艺术地再现看这些问题总是不断地成为艺术家、哲学家以及艺术批评家们反复研究的课题。在希腊古典美学中，学者们迷惑于听觉与视觉美感的选择性而提出了一整套有关形式美法则的学说，诸如比例，对称与平衡和节奏之类，这些法则直到今天仍然是我们分析知觉美感的圭臬。十九世纪的法国印象派画家则是看的艺术和艺术地再现看的执着追求者，他们感悟于光、色和视觉科学的理论进步和发现，致力于在画布上再现光这个视觉主题，可以说没有任何一个流派的画家把眼睛和阳光这样自觉地联系在一起来处理看的艺术这个问题。1874年莫奈以他的《日出的印象》这幅写生画拉开了欧洲印象派绘画的序幕，并终生执着于在画布上再现光的视觉印象的追求。这个画派的艺术强调外光写生就是画光而不是画对象的形体。画笔在画布上涂绘颜料的过程就是记录眼睛的原始知觉印象，画面上的色块就是模拟外景在眼球视网膜上的光影印象。印象派画家的这种作画观念显然是那个时代视觉和色彩研究成果大普及的结果，当时人们对印象派绘画的这一特点也是看得清楚的，一开始有的人便干脆把他们称为“视觉派”（法文的英文直译为“The school of eye”）。当时的激进主义文学家左拉这样称赞印象派绘画：“我敢说没有一个时髦画家能给我们这样一幅图画：眼界更宽广，更充满空气和阳光。”并用生动的文学笔调来描述毕沙罗的一幅风景写生画：“在他的画中，水是活的，深的，首先是真实的。拍打船舷的微绿细浪被白色的光打碎；微风乍起，荡起海绿色的波浪；水拉长并弄碎了树的倒影；水呈现淡淡的和柔和的色彩，被一点一点强烈的光映亮。”左拉的话使我们能从印象派绘画里生动地体会到看是门艺术这句话的含义。印象派绘画的构成要素就是光。印象派画家就长着一双自然的眼睛，在他们看来，绘画的艺术性就取决于视觉敏感性。这就是看的艺术。

是否看的艺术仅止于再现视觉真实呢？回答是否定的。人们通过艺术发现视觉，也通过视觉本身的研究来揭示艺术表现的科学规律。我们在上面所追溯的对自然作似真描绘的演进过程，或者说追溯西方绘画艺术走向完善的进步过程，这一过程的特别之处就在于科学的介入，将科学的方法（投影几何学，解剖学，色彩学等）与技术用来加速旨在获得“真实再现视觉现实”的尝试，这一过程直到摄影术、彩色电视、立体宽银幕电影和全息摄影术的发展为止。在这一方面科学超过了艺术。实际上印象派艺术家在再现视觉真实上将表现光作为首要的追求目标时，已经对眼睛视网膜上的知觉印象进行了抽象，因此，在印象派画家那里，看的艺术是高度风格化，高度个性化的。正如英国当代著名美术理论家 E.H. 贡布里希所指出的那样，艺术家不可能在画布上转录他所见到的东西，即使是所谓的写实派画家，他所能做的只不过是把他所见到的“翻译”成他的画手头的表现形式罢了。艺术家的职业便是与视觉信息打交道，他们用颜料的色彩来编码他们的视觉发现，通过点、线、面、形，光影和色彩来再现他的发现，从而制作出我

们称之为“图画”的那种东西来。所以贡布里希特别称赞英国已故首相——一个业余风景画家的温斯顿·丘吉尔关于绘画的见解，丘吉尔认为，画家在画布上所表现出的他所接受到的视觉信息，“是用代码传递的，它已从光线转为色彩”。由于这个原因，不少美术史家认为现代美术源于印象派。到二十世纪六七十年代，一些艺术家又转向创作出那些旨在记录眼睛和大脑纯粹视觉生理效应的图像。学界将他们称为光效应艺术家，这类艺术品常以捕捉视错觉，视幻觉和主观感色及主观运动幻觉为特征。不能不说，这又是另一类关于看的艺术，他们基于现代视觉生理和心理科学研究的成果，以及艺术家个人对这些生理和心理效应的视觉敏感性，以图像的形式探索使普通人都能毫不费力地认识这种生理效应的条件，并试图以此创作一种独立于文化之外，而且不受文化濡化影响的视觉艺术。其实这种艺术并非光效应艺术家们的新发现，也从来未曾脱离过文化的烙印。正如美国自然主义美学家托马斯·门罗（Thomas Munro）指出的那样，“美感和艺术是生物性个体对环境适应的产物”，视幻觉既是一种人与环境沟通所出现的一种生理自然现象，人类又将这种自然现象所出现的符号当作信息来接受，那么它本身就会成为人类社会文化的原料。许多原始宗教在利用文化和艺术上都曾借助过这种符号，甚至利用天然致幻药剂来人为再现这种生理效应，并将这种幻觉图像复制成唤起信仰的宗教符号，在这里，看的艺术在人类文明的拂晓便成了宗教利用的工具。

综上所述可见，光、眼睛和看对于人类来说，所包含的内容实在是太丰富了，关键就在于它们在构成人类文化这个信息系统中所起的作用，而对这种作用的重要性，我们是无法找出一个恰如其分的词来加以形容的。

第二节 什么是色彩？

卡尔·马克思认为：“色彩的感觉是一般美感中最大众化的形式。”由此，他对金、银和财富的审美形式作出了精辟的论述：“它们的美学属性使它们成为满足奢侈、装饰、华丽和炫耀的天然材料，总之，成为剩余和财富的积极形式”，“随着贮藏的直接形式，发展着它的审美形式，即对金银作为奢侈品的占有”。这种审美属性就是它们从地下采掘出来便具有的天然色彩和光泽，金银这些贵金属之所以能充当起这种神奇的角色，仅仅是如何稀少是说明不了问题的。在如此重大的论题上（指政治经济学）马克思如此重视视觉美感的作用，可见色彩科学内涵之深广。无论从经济学还是人本主义心理学的观点看，人的审美这种精神需要的确与奢侈相关。

自然美是现实世界美感中最直接，最广泛，也最大众化的感受，而自然美就是光色之美，形态之美和声律之美，其他一切美的高级感受都是由这些视觉和听觉基本感受派生或演化出来的，人们对物质世界的感知，90%以上的成分都是从这两种感觉通道得来的，难怪柏拉图干脆把美认定为“是由视觉和听觉产生的快感”，并且曾强调“美只起因于听觉和视觉所产生的那种快感”。可以说这是一种朴素的美学观，尽管柏拉图本人后来又否定了这个观点。然而，我们如果将视觉和听觉与人的其他感觉作个比较便不难看出，不但在信息的获取量上远远超过其他感觉，例如触觉、嗅觉和味觉，而且人在视觉和听觉感受到的外界刺激而引起的高级神经活动的层次上也更高于其他感觉。托马斯·阿奎那把这一点说得更明白，他说“与美感关系最密切的感官”的眼睛和耳

朵是“为理性服务的感官”。虽然有人把美味佳肴称为色、香、味的艺术，巴黎香水把嗅觉艺术化，还有些人试图创造一种用手摸体感的触觉艺术。但人类艺术的殿堂始终是由形象和声音构建而成的。从动物的快感到人类的美感，视觉和听觉可形成的感受更独立于人的低级欲求之外，而色彩，正如马克思所说，是“一般美感中最大众化的形式”，对于色彩美感，人们不无诗意，有人称颂色彩“是太阳神头顶的光环，是大自然脸上的红晕，是人类心灵的震悚”。

什么是色彩？这个问题曾困扰过一代又一代的伟大学者，只是在近 300 年间对这一问题才得出了科学的答案，但这一问题直到今天在不同人的心目中，色彩仍意味着不同的概念：在化学家的脑海里，色彩便是染料或颜料，是一种化合物；在画家的眼里，色彩与颜料等价，犹如作为颜料商品所称呼的“Water Colors”或“Oil Colors”等等，另一方面，也是更为重要的，色彩是画家表达其艺术情感响应的一种抽象成分；对物理学家说来，色彩则是光源或物体的某种物理度量；而对于绝大多数普通人，色彩总是与具体的事物联系在一起而被当成事物的一种属性。但我们要说，关于物体的颜色和光的颜色的这种说法，如同说太阳天天升起又落下一样，基本上是不对头的，然而这类说法使我们在日常生活中感到十分满意，色彩被错误地视为事物的性质，在日常生活中起着许多实际的作用，正如农民从西红柿的颜色来判断它的成熟程度那样，色彩等同于事物某种内在性质的表征。

从柏拉图和亚里士多德的著作里，我们可以看到关于色彩的早期观点，尤其是亚里士多德，他对色彩充满探索的兴趣，给后人留下了许多东西，他提出的色彩理论在西方文化里有长达两千多年的统治地位，他的有些见解直到今天仍然经得起时间的考验。亚里士多德认为“无论什么东西是可见的便是色彩，颜色就其本性而言，就是可见的东西。”指出色彩是一种视见现象，并强调了物体与光的相互作用在呈现色彩上的意义。他说：“纯净的光，像来自太阳的光那样，是没有颜色的，但它之所以有颜色，是由于同物体发生相互作用时它被削弱了，这些物体具有特定的性质，于是这些性质便产生出色彩来。”但在亚里士多德的色彩学说中所包含的白光是纯净的光，色光是不纯的光这个错误概念，直到两千年后才被牛顿用实验加以纠正。

牛顿对色彩学的贡献是带根本性的，他首先对什么是色彩这个问题给出了正确的回答，牛顿认为“光没有别的什么，只是有某种能力或支配力，它决定光使我们产生这种或那种颜色的感觉。”“色彩是大脑对眼睛的视网膜接受光线后的响应而产生的一种感觉”。根据牛顿所开创的色彩理论，后来的科学家才在生理学和心理学领域里对色彩这种视感觉作出进一步的揭示，在生理学家那里，色彩被视为发生在眼睛视网膜神经细胞里的电生理活性；实验心理学家则对色彩作出了类似牛顿所下的定义；色彩是眼睛的视网膜接受光刺激后所产生的视觉。

在牛顿之后的两百年来年里，关于色彩知觉现象的科学原理一直为艺术家，音乐家和文学家感兴趣，德国诗人哥德是最典型的一例。他曾说：“在我这一生中，一直到现在（1827 年），重大的科学发明一个接着一个出现，所以我不仅早年就投身于自然界，而且把对自然的兴趣一直保持到现在。”他在色彩学上花费了半生的功夫，“放弃了五、六部悲剧的写作”，他在 1810 年把他对色彩知觉的观察总结成了一本书——《色彩论》，（Farbenlehre）。英国画家透纳曾研究过哥德这本关于色彩的书，并按书中的分析作过一

些色彩构图的练习，他还在英国皇家学院的讲演中流露出他有同牛顿一样的对于色和光的研究的兴趣。人们从他的光色迷蒙的风景画中不难看出透纳所言是认真的。但必须指出，哥德的色彩论完全来自于他的感觉经验和亚里士多德的学说，我们现在所知亚里士多德的色彩理论，许多都是从哥德的书中读到的。哥德虽然生活在牛顿之后的时代，但他对牛顿的学说似乎只字未曾提到过，也不提光的波长这个概念，哥德虽然自诩崇尚科学，在这个问题上的态度却显得异常固执，并对牛顿色彩论在德国的传播深为反感，认为阐述牛顿色彩论的人都是在坚持错误，并攻击他们是“依靠错误来维持生活”，说牛顿色彩学说的基础就是错误的。

牛顿以他对日光的三棱镜分解与再合成的实验，结束了亚里士多德留给后人的错误观念，他在 1675 年应皇家学会的要求写成了关于光学的论文（分别于 1669, 1670 和 1671 年在剑桥大学公开宣读，并在 1704 年首次公开出版，是为牛顿著名的《光学——关于光的反射、折射、拐折和颜色的论文》“Opticks or a Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light”），尽管牛顿研究的主要兴趣并非专门针对颜色现象及相关理论，与许多著名定律或定理的发现都是牛顿更宏大研究目标的副产物一样，这些论文是关于颜色理论最初科学基础的知识宝库。图 1-8 是牛顿论文里关于日光三棱镜分解与再合成实验的插图。他在《光学》第一篇里将通过实验建立起来的单色光的概念纳入基本定义之例：

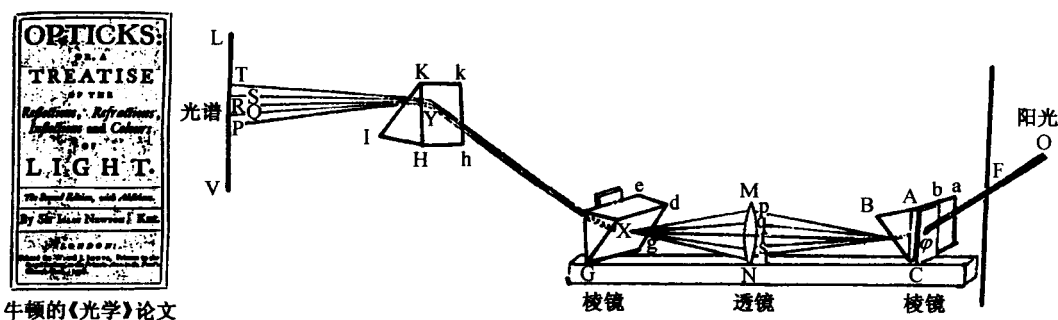


图 1-8 牛顿关于日光三棱镜分解与再合成的实验

定义 7：我将其光线的可折射性全都一样的光称为简单的、单色的和相似的光，而将某些光线比其他的更可折射的光称为复合的，杂色的和非相似光。

定义 8：我将单色光的颜色称为原色的，单色的和简单的；而将杂色光的颜色称为杂色的和复合的。

因为这些杂色光总是由单色光的各色复合而成的。牛顿还明确地将太阳光的复合性质以命题和定理的形式加以论定：

“命题 3, 定理 3：太阳光由可反射性不同的光线所组成，并且那些比其他光线更可反射的光线更具有可折射性。”

“命题 5, 定理 4：白色和所有介于白色与黑色之间的灰色，可由各种颜色复合而成，而太阳光的白色由按一定比例混合的原色复合而成。”

牛顿是光本性微粒说的主张者，与他同时代的惠更斯则将光当作波动来进行研究，

因此在牛顿关于单色光和复合光的概念中，并未将单一与复合究竟是指什么成分而言讲明白。现代量子力学将光的这两种曾经在学术界认为是不可调合的本性和谐统一了起来。今天，我们已经可以从科普知识的水平之上从光的波动与微粒二重性来认识白光、单色光、复合光的准确概念；单色光就是波长成分单一的光，例如从激光器发出的光；复合光就是由多种波长成分的可见电磁辐射组成的光；白光就是在可见光谱的范围内能量水平较高且分布比较均一的复合光，各种低能量水平的均一分布的复合光便是不同高低影调层次的灰与黑。彩图 3 便是按现代科学的观点对牛顿色光学说所作的表述。可见光范围内的能量分布曲线 $E(\lambda)$ (400~700nm) 便是关于色光本性的最精确的物理表征。

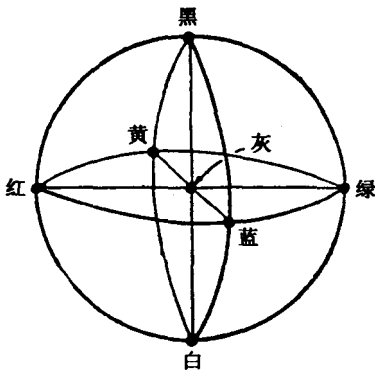


图 1-9 亚里士多德的不朽色彩构架

牛顿以令人信服的实验和论证将人们从此带出了亚里士多德关于白光与色光孰纯孰杂的误区。但亚里士多德关于色彩的学说还有一个后人无法超越的贡献，便是关于色彩空间秩序的构想，图 1-9 是亚里士多德先于牛顿两千年所提出的一个不朽的色彩空间构架。从图上一目了然，现代任何一种三维色空间和色系的构造，都未超出亚里士多德的设想，色相环平面，明度（灰度）标尺，饱和度变化的暗示，全然容纳其中。更令人惊异之处是，在亚里士多德的色彩构架中，后来关于三原色理论和对立色理论在他的色彩体系中如此和谐自然，

蓝/黄，红/绿，黑/白这些在后来赫林的色彩理论中的三组对立原色概念，亚里士多德早已替他安排妥当，只有一点与之不同，那就是亚里士多德把黑色置于空间上方，白色置于下方，这倒与中国古代“天地玄黄”的宇宙观相类似，亚里士多德也与中国人一样

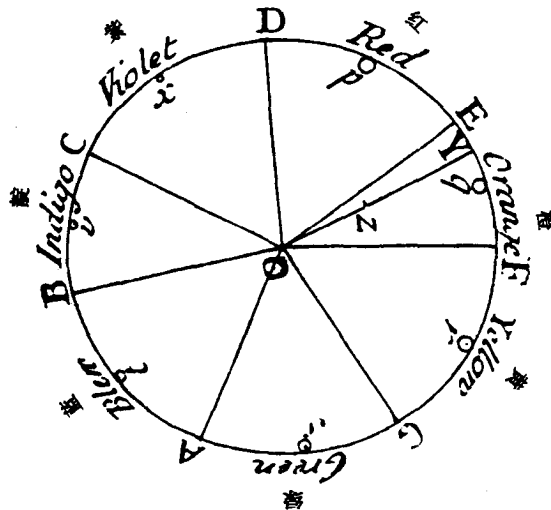


图 1-10 牛顿色环

以玄象天。亚里士多德智慧过人之处在这里还体现在对有彩色系色相秩序的安排方式上，他将红、黄、绿、蓝的色相变化置于周而复始的圆环之上。两千年后，牛顿通过白光的棱镜分解光谱和彩虹现象的观察与研究，并玩了一阵子色块“扑克牌”游戏（每次在众多色块中随意抽出一张，然后按色彩相似程度来排序，排列最后的结果都是首尾的两个色块的色彩又复接近起来）之后，方悟出色相这个感觉“属性”是不能在轴坐标系上表示出秩序关系来的，而必须用极坐标系上的相位角坐标来定位。于是他按音律将色谱划分出红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫七个色段，并将其置于圆周之上，这便是著名的“牛顿色环”（见图 1-10）。到十九世纪，奥地利生理学家亥姆霍兹澄清了色光和色素物质两种色彩混合及其原色概念上的混淆后，科学的色相环才最终得以确立起来（本书后面有关章节将对此详述。）

第三节 视觉传达信息

人类智能的基础是处理信息的能力，信息处理是建立在接收信息之上的，人的感官功能和知觉是为接受、传达和处理信息而进化得来的。视觉认知则是人类智能的关键与中心问题，在人类智能所处理的所有信息中，视觉传达信息占了总量的 80% 以上，视觉传达信息的原始形式便是通过眼睛的几何光学系统映射在视网膜上的图像，至于人类智能怎样从这幅图像去提取信息，从而再认呈现在视觉上的现实世界，这是认知心理学和人工智能科技必须深入研究的问题，本书不能对此作详细的介绍，这里只从一个初浅的水平上，对图像这个视觉传达信息的原始形式试作一通俗的量化形式的描述。量化的概念与认识之所以必须，就在于日新月异并不断普遍介入普通人生活的人工智能技术，很大程度上都涉及到图像处理与再认，这一切皆以计算机科技为核心。而计算机“做事”的本领便是建立在数学模型，或更直截了当地说是数值化模型基础之上的。

图像是现实世界的一种映像，而现实的视觉世界则是一个布满可见电磁辐射的能量场，可以表示成

$$E(x, y, z, \lambda, t)$$

其中： E 代表能量； x, y, z 是现实三维世界的空间坐标； λ 是电磁辐射的波长，对人类的视觉世界而言，可以界定在 400~700 nm 之间； t 是现实世界这种能量分布状态的观察时限，即时间坐标。这个关系式便表示了在一定的观察时间和空间范围内（如果将 x, y, z 和 t 这四个自变量的定义域都确定下来的话），可见光能量的分布状态。图像则是视觉器官（即眼睛），摄取图像的仪器（例如照相机与摄像机）以及各种重建视觉印象的各种手段（例如画家的笔，设计家的图板等）对这个能量场进行的一种变换所得到的结果，即得出一幅映像，若将图像用字母 I 来表示，这个关系便可以写成：

$$\text{能量场 } (E) \longrightarrow \boxed{\text{光学仪器, 眼睛, 重建视觉世界的手段}} \longrightarrow \text{图像 } (I)$$

或者写成一个数学关系式：

$$I(x, y, \lambda) = f[E(x, y, z, \lambda, t)]$$

图像是二维的，故只有 x, y 两个空间坐标。第三个方向——深度上的信息包含在平面图像的几何（透视）线索之中，即 $z(x, y)$ （当然还有各种非透视关系的深度信息，这将

在空间知觉的章节中叙述)；图像的色彩特征将含在自变量波长 λ 之内。图像 $I(x, y, \lambda)$ 一旦被一幅一幅地记录下来，每幅图像便不再随时间而改变，因此在图像的表述式中既不含深度坐标 z 这个变量，也不显含时间 t 这个变量。那么从数学物理学上讲， I 究竟是一个什么量？它仍然是能量， $I(x, y, \lambda)$ 在每一点上的值，即图像的构成单元，便是“像素”，仍然是能量水平的高低，即在那个点上的可见光能量分布 $E(\lambda)$ 即图像在每一个点上的色彩和明暗程度。由于物质手段的限度，几何学上的点并不存在，图像上的点仍然是有面积大小的。以光学变换图像为例，点 $(\Delta x, \Delta y)$ 的大小程度便决定了变换手段在技术上所达到的精细程度，故像素大小的程度便是图像分辨率的度量。

再看等式右边的关系 $f[E(x, y, z, \lambda, t)]$ 。任何重建视觉世界的手段都是局限在一定的时间、空间范围内，并在一定的照明条件和特定的纪录媒体上进行的，以照相机为例（因为它最像人的眼睛），镜头的焦距（等效于视角），光圈数，滤色镜使用以及气象条件决定了图像能记录的空间范围和深度（景深）；装什么样的感光片（黑白还是彩色，灯光片还是日光片，或其他特种波段的感光胶片）以及用什么样的滤色镜和镜头内透镜的镀膜质量将会影响图像的色彩；拍照时所使用的快门速度实际上便是一个时间间隔。所有这些在数学上便表示为函数自变量的取值范围，即定义域或边界条件，故为 $x_1 \leq x \leq x_2$, $y_1 \leq y \leq y_2$, $z_1 \leq z \leq z_2$; $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$; $t_1 \leq t \leq t_2$ 。现实的视觉世界 $E(x, y, z, \lambda, t)$ 在几何上是三维的，而视觉映像则是二维的。将摄影技术与人眼作类比，在摄影技术中图像的精细程度决定于胶片乳剂粒子的细微程度或数码技术的 dpi（每英寸长度内的点子数），人眼视网膜上图像的精细程度便是由视细胞的解剖学尺寸决定的，从目前科技发展的水平上看，仍然是人眼最高，胶片其次，数码技术在力争达到照相胶片的水平。

现代信息传播的特点是图像所占的比例越来越大。另一类与之并列的传播形式或传播通道是语言和文字，它们曾是人类文化传播的主流，语言和文字是描述性质的传播信息。描述本来也是对对象的精化，但免不了受主、客观因素的影响而出现疏漏，走样，乃至于歪曲。在文字出现之前，人类也用一些符号化的图像来记录和传达信息，文字出现（一种特殊的视觉符号体系）之后，图像便成为一种辅助性表达手段，亦如各种信息文本上的插图，用以补充语言、文字描述的不足。但图像作为现实视觉世界原型，它所提供的直观作用，不是语言、文字描述所能达到的，针对一幅图像，人类智能能从中挖掘出的信息量，不是用同样尺寸幅面的语言文字描述可以穷尽的。有人曾对这两种信息传达方式的能力和容量作过量化的估计，如果将语言文字的能力定为 10^0 量级，图像的量级则为 10^3 ，或者表示成

$$10^0 \text{ 图像} = 10^3 \text{ 文字}$$

这种估计的精确与否并不重要，图像信息在容量上的丰富性，信息内在关系的直观性以及与此相关的在信息传达的有效性上都是语言文字所不能比拟的。惟一的缺点在于图像的重建，处理与传播则要比语言文字困难得多，技术上也复杂得多。也正是图像信息传播的需求才使计算机科技走上了一个又一个更高的新台阶。

图像是人类认识和改造现实世界过程中接触到的一种最重要的信息源，今天的人们天天都在同这种信息源打交道，从事不同职业的人以不同的手段同这一信息源打交道，并以不同的手段重建视觉图像，也就是说他们在以各自不同的方式和观念在从事

$f[E(x, y, z, \lambda, t)]$ 这样一个变换。摄影家用照相机，并带着再现客观视觉世界的追求在进行着这个变换；而画家则用画笔和颜料，按照他的艺术观念在进行这一变换。设计师则用他的制图工具和图纸，按照制造客观现实事物的目的在进行这一变换；计算机专家则通过图像处理技术来进行这一变换。

第二章 色彩视觉现象

一个物体在视觉上引起的颜色感觉是由以下三种因素决定的：

(1) 物体表面将照射光线反射到空间的性质，这种性质决定于物体表面的化学结构与组成，表面物理与表面几何特性；

(2) 照明光源的性质，即光源的波长构成特性-光能在相关视觉波段范围内的能量分布，从光源的色品质量而言，也就是它的色温；

(3) 眼睛的感色能力，主要决定于视网膜上的视神经系统感受分布于其上的光线的能力和处理与传送光刺激的能力。

第一节 色彩及其感觉的量度

色彩及其感觉与其他自然现象一样，可以进行定量研究，对各种色彩是可以进行定量比较的，正如同物体的轻重、大小，声音的高低、强弱一样。但色彩作为一种心理物理学现象，一方面从客观上认识，对引起色彩感觉的光刺激可以作客观测定，另一方面从色彩感觉这种主观响应来认识，也可以作精微的描述。一种角度着眼于客观的光刺激，一种角度着眼于主观的感觉响应，在这两种不同的研究范畴里，色彩的概念和描述——定量的量度或定性的语言描写都是不同的。表 2-1 归纳比较了色彩在三种不同角度的研究范畴里的含义。

表 2-1 色彩在三种不同研究范畴里的含义

	心理物理学	色 度 学	心 理 学
关于色彩的概念	色彩是可见光波段范围内的一种能量分布状态,它是引起色彩感觉的光刺激作用。	任何色彩都可以通过三种原色混合而成,以色光混合为例,一个色彩是由一定比例的红、绿、蓝三种原色光混合而成的。	色彩是视觉器官在光刺激下产生的一种视感觉。
描述方式	可用分光光度计进行定量测定,得出光刺激的光谱能量分布曲线 $E(\lambda)$ 。	可以用色度仪对色彩进行测量,确定其原色比例而定量地表示成: $C = r(R) + g(G) + b(B)$	可以用颜色词,如红、绿、黄、蓝等及形容其程度的词如浓、淡、明、暗等语言作定性的描述。

从表 2-1 可见，在不同的研究范畴里，色彩有不同的含义和量度（dimensions），其研究与描述方式也各有其不同的价值。心理物理学研究重视光刺激的客观表征，每个色彩，无论是光源的色或从色素物质表面反射出来的色，其光谱能量分布曲线 $E(\lambda)$ 无异于一个人的指纹，它最能客观地表征各种色彩刺激的微妙差异乃至色彩物质的个性

特征。色彩的色度学研究则更具有实用的价值，如计算机与彩色电视显示器上的调色技术，彩色摄影与彩色印刷中的演色指南，涂料工业、颜料工业以及以艺术或技术目的的各种再现色彩的工作，都可以在色度学研究的指导下成为一种精确量化的技术，作为工业生产品质指标的色彩标准更是色度学研究成果的直接应用。以上两个范畴的研究，在本书后面各章中都会作不同程度的讨论。在这一节里，我们将以色彩的心理物理学量度作为色彩视觉现象的基本问题来讨论。

一、色彩视觉的三个心理学量度——色相、饱和度和明度

色彩的光谱能量分布表征和色度学的原色系数关系式，基本上是物理学家和工程技术界人士搞出来的，艺术家和心理学家常常不关心这类研究。物理学的或色度学的度量虽有客观、定量的优点，但它们都不能说明色彩的各种非定量化特性，即色彩对人的心理和行为的影响，这种影响在日常生活中起着重要的作用，例如在建筑、绘画与其他实用美术中，人们在认识色彩心理效应的种种富于情感响应的方面已有十分悠久的历史。色彩视觉的三个心理学量度（three psychological dimensions of color）——色相（hue）、饱和度（saturation）和明度（brightness），是认识其他色彩心理效应和情感响应的基础，识别色彩与色差鉴别也同样建立在这三个基本心理学量度的基础之上。

1. 色相

色相是色彩的一种最基本的感觉属性，这种属性可以使我们将光谱上的不同部分区别开来。即按红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等色感觉来区分色谱段。缺失了这种视觉属性便无所谓色彩了，就像全色盲人的世界那样。根据有无色相属性，可以将外界引起的色感觉分成两大体系：有彩色系与非彩色系。

(1) 有彩色系（chromatic colors）即具有色相属性的色觉。有彩色系才具有色相，饱和度和明度三个量度。

(2) 非彩色系（achromatic colors）即不具备色相属性的色觉。非彩色系只有明度一种量度，其饱和度等于零。

2. 饱和度

饱和度是那种使我们对有色相属性的视觉在色彩鲜艳程度上作出评判的视觉属性。有彩色系的色彩，其鲜艳程度与饱和度成正比，根据人们使用色素物质的经验，色素浓度愈高，颜色愈浓艳，饱和度也愈高。描述饱和度感觉的程度词是浓、淡、深、浅。非彩色系是饱和度等于零的状态，正如同我们在彩色显示器上将色彩逐渐调淡，到最后便成了黑白画面一样。

3. 明度

明度是那种使我们可以区分出明暗层次的非彩色觉的视觉属性，这种明暗层次决定于亮度的强弱，即光刺激能量水平的高低。请注意：不要对这一定义产生误解，即并非有彩色系便没有明度属性，只是强调明度这一视觉属性是排开色相属性，只计及明暗层次的感觉，就像用黑白全色胶卷拍照片，只记录明暗层次而不记录色相那样。根据明度