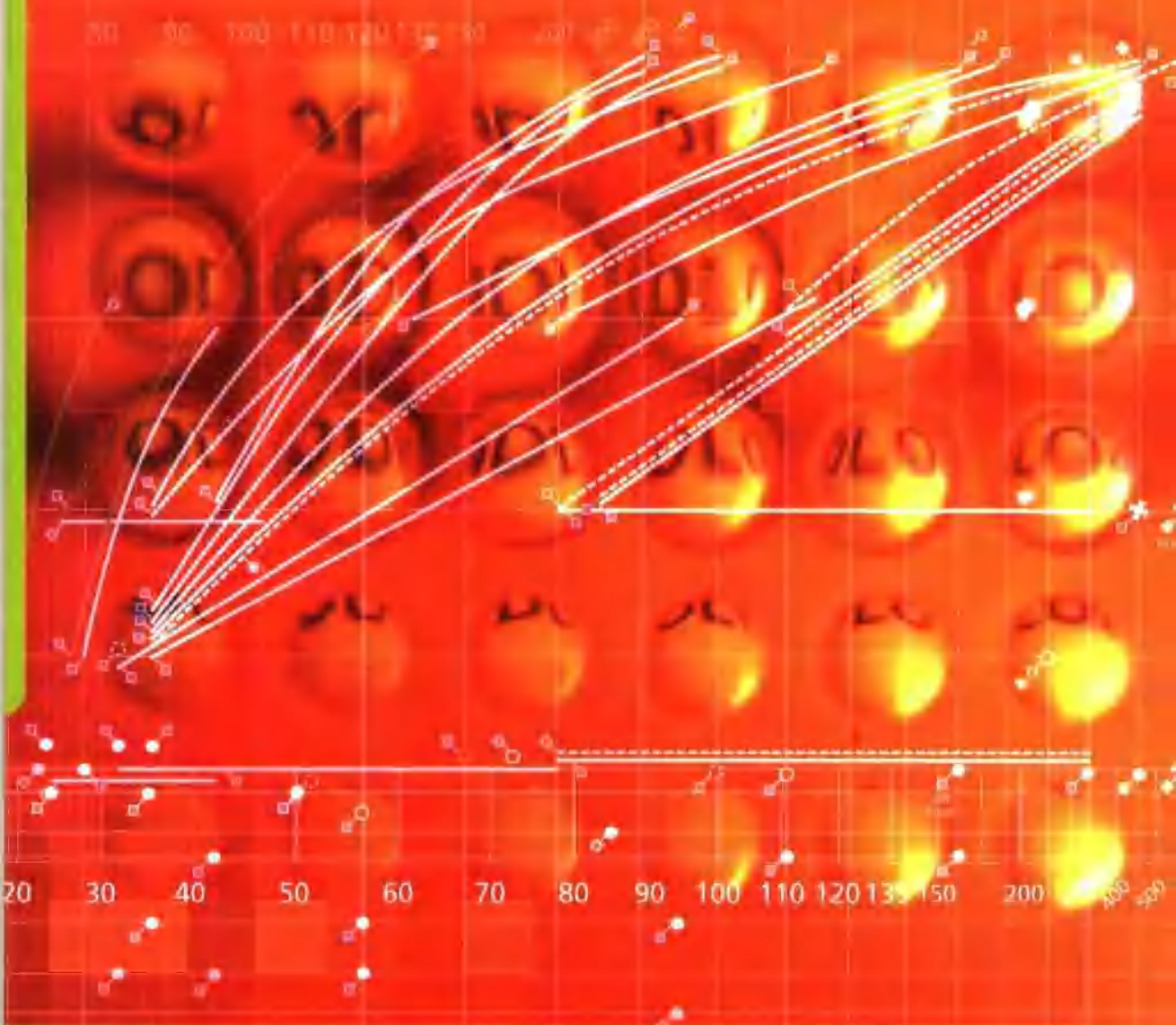




Official Serial Textbook of Beijing Film Academy

北京电影学院摄影专业系列教材



摄影光学与镜头

The Photographic Optics & Lenses

钱元凯 著

浙江摄影出版社

摄影光学与镜头

北京电影学院摄影专业系列教材

钱元凯 著

浙江摄影出版社

责任编辑:余 谦

装帧设计:任惠安

封面设计:刘灿国

责任校对:朱晓波

图书在版编目(CIP)数据

摄影光学与镜头/钱元凯著. --杭州:浙江摄影出版社,2005.12

(北京电影学院摄影专业系列教材)

ISBN 7-80686-443-1

I. 摄... II. 钱... III. ①摄影—光学—高等学校—教材②摄影镜头—高等学校—教材 IV. TB8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 147357 号

北京电影学院摄影专业系列教材

摄影光学与镜头

钱元凯 著

浙江摄影出版社出版发行

(杭州市体育场路 347 号 邮编:310006 电话:0571-85159646)

网址:www.photo.zjcb.com

经销:全国新华书店

制版:杭州兴邦电子印务有限公司

印刷:浙江印刷集团有限公司

开本:787×1092 1/16

印张:13 插页 2

印数:0001-3000

2005 年 12 月第 1 版

2005 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 7-80686-443-1/J·085

定价:28.00 元

如有印、装质量问题,请寄承印单位调换



钱元凯 男，高级工程师，中国摄影家协会会员。

1968 年成为业余摄影器材爱好者，自制 7 台照相机及闪光灯、放大机、测光表等摄影器材与多种相机测试仪器。

1982-1994 年进入北京市照相机总厂研究所任主任设计师，主持多种相机的研制。其中“EF3”相机获北京市科技成果奖，全国照相机评比一等奖。1994-2002 年在北京飞索公司（后改为（香港）新明光电技术有限公司）任总工程师，创建国内首套系列化的狭缝光栅立体图片制作系统，投入商业运行，并获 5 项专利。1994 年任全国照相机机械标准化技术委员会委员。1994 年至今先后被聘任为《大众摄影》、《摄影与摄像》、《电子影像》、《中国摄影》等杂志的编委。1996 年起任北京电影学院摄影学院客座教授。

1989 年与周祥文合著《照相机的原理与维修》，1996 年著《摄影光学与照相机》，2000 年著《现代照相机》（中国摄影函授学院教材），2001 年著《数字影像技术基础》（北京电影学院摄影学院讲义），2003 年著《现代照相机的原理与使用》（北京电影学院摄影专业系列丛书）。1989-1998 年在《中国摄影报》任《读者问答》专栏撰稿人。1989 年以来在《中国摄影报》及其他摄影刊物上发表有关照相机与照相技术的文章约 300 余篇。

北京电影学院摄影专业系列教材编委会

主 编：张会军

副主编：宿志刚

编 委：（排名不分前后，以姓氏笔画为序）

冯汉纪	冯建国	朱 炯	宋 靖	张 铭
吴 毅	陈 建	陈 纲	郑 涛	钱元凯
顾 铮	唐东平	屠明非	宿志刚	曹 颀
崔 畅	曾 璜			

《北京电影学院摄影专业系列教材》是在前一套《北京电影学院图片摄影专业系列教材》的基础上重新组织、策划而编写的。在这里，首先要感谢各位作者的加盟，有了各位作者的辛勤努力，才有今天的教材问世。这套教材的出版将有益于当今中国高校摄影教育的发展，对当前缺少专业摄影教材的高校无疑是雪中送炭。我们试图通过我们的工作为社会、为时代的发展做一点有益的事。这套教材是在浙江摄影出版社的帮助下才得以出版的。感谢各高校师生对我们工作的支持。由于时间紧迫，此套书在编写中难免会有这样那样的缺憾，敬请各位老师、同学及读者谅解。我们会在今后的工作中加以完善和改进。谢谢。

北京电影学院 2003 年 12 月

Qianyan 前言

本书是根据笔者在北京电影学院摄影学院讲授《照相机与摄影光学》的讲义编写的。有关照相机的内容，已在本系列教材《现代照相机的原理与使用》中讲述。阅读本书之前应当具备使用照相机的基本知识，否则建议首先学习《现代照相机的原理与使用》第一章的内容。

自从20世纪90年代初期，笔者在《中国摄影报》主持《读者信箱》及在北京红旗业余大学摄影班开设照相机课程以来，接触了大量的业余摄影爱好者与学习摄影的大学生。我深深体会到：随着人们生活水平的提高，我国摄影人使用的器材正在与国际接轨，但是使用器材的水平却与国外摄影人相去甚远。特别是近几年，“唯武器论”甚嚣尘上，令许多工薪阶层的影友倾其所有盲目购置高档器材，在使用中又存在诸多误区，以至使用专业相机与镜头却拍不出技术质量过硬的照片。我希望本书能有助于提高中高级摄影人使用镜头的水平。

本书尽量略去有关光学与镜头结构中比较繁琐、艰深的内容，力求以深入浅出的方法介绍与摄影直接相关的光学知识与最基本的光学计算方法。此后通过镜头焦距与光学素质的选择、景深控制、镜头的测评等章节，使读者逐步掌握选择与使用镜头的知识与技能。

本书每章之后都有大量的思考题，选自笔者多年任教所积累的题库。读者可以在学习各章之前先对照答案选择填空题，检测原有的知识水平，提高阅读的兴趣。学完相应的章节后再次解答习题，以检验学习的效果。凡是答错的，表明尚未掌握相应的知识，应当重新复习相关的内容。书中有大量的表格，其中有些是对正文的总结，如表2.6、表3.6等，可以作为读者的复习提纲。读者应仔细研究这些表格：它有哪些项目，遮住表体的栏目回答；所论述的主题有哪些子项目？每项的

核心内容又是什么？为什么会得出这样的结论？通过研读表格，可以帮助读者领会相应内容的关键知识。另一类表格是对文章的补充，例如表 1.1、表 1.2 等，可供读者在用时参考。引号中的字符都是镜头上常用的，记住其含义与功能将能显著提高读者使用各种新型镜头的能力。文中的圆体字是比较重要的内容或结论，阅读时应特别注意；小号楷体字是参考内容，是对正文有关论述的深入解释。由于我国摄影专业以文科学生为主，数理基础较差，这部分内容可以略去，仅掌握正文中相关的结论即可。

本书主要供摄影本科《摄影光学与镜头》32 学时授课之用，删除部分内容也可以用于摄影专业的大专班。教师仅需讲授其中二分之一的比较重要或艰深的内容，其余应由同学们自学。

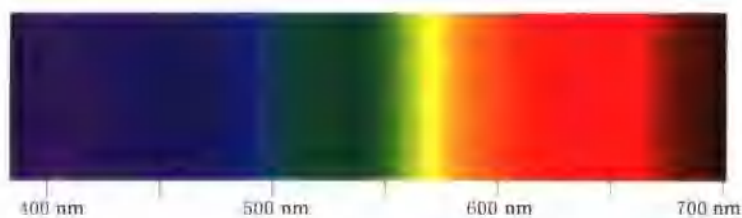
在摄影专业教学中，《摄影光学与镜头》应当是一门以实践为主的技术基础课，教学中可以选择本书每章习题中的“摄影实习与试验”的部分内容作为作业。

本书也可供有心钻研摄影艺术的业余爱好者提高技艺，建议这些读者利用闲暇的时间尽量做完所有的“摄影实习与试验”题；正是对这些基本功掌握的程度不同，形成了专业摄影师与业余爱好者在相机与镜头操控技术上的许多差异。

如果本书能使读者明白：没有最好的镜头，只有最适用的镜头；创作出好照片的关键不是好的相机与镜头，而是掌握器材的人，则这本书就达到其最终目的了。

钱元凯

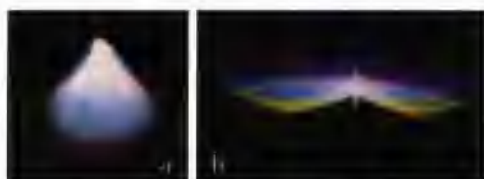
2005.10



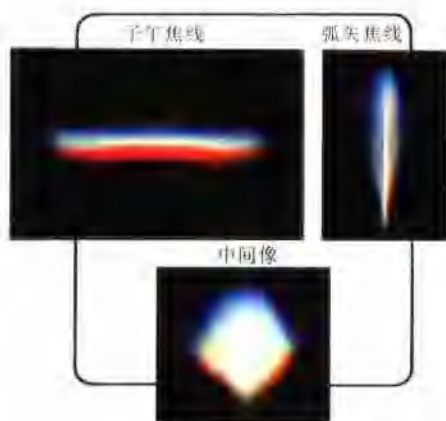
彩图1 可见光的光谱分布



彩图2 球差所形成的光斑



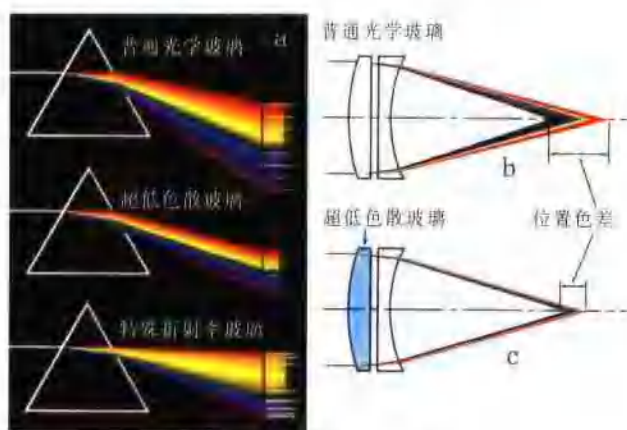
彩图3 慧差形成的光斑



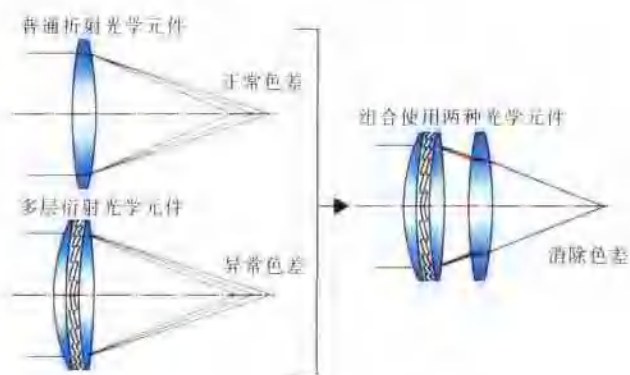
彩图4 像散与倍率色差形成的光斑



彩图5 位置色差形成的光斑



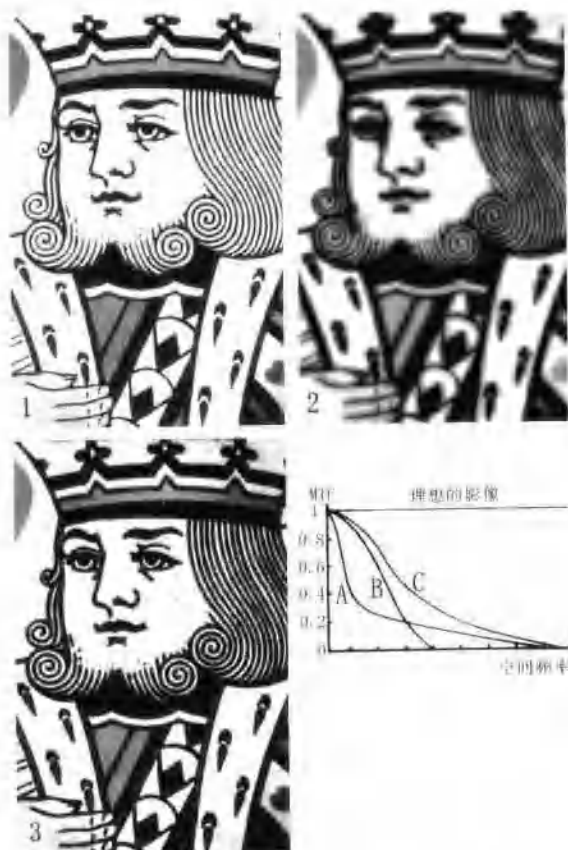
彩图6 特种光学玻璃



彩图7 用多层衍射光学元件消除色差



彩图 8 防反射膜的作用



彩图 10 三种不同的镜头及其 MTF 曲线

A-	A+	B+	B	C+	C	D	F
----	----	----	---	----	---	---	---

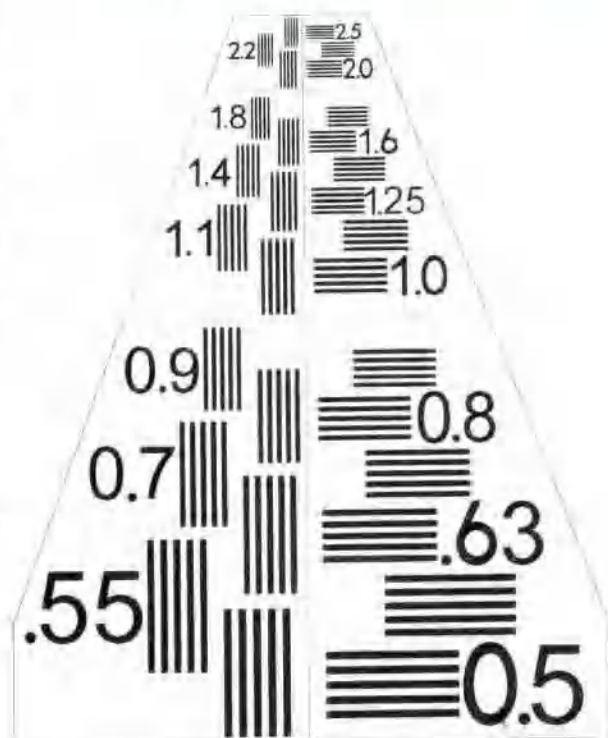
尼康 128mm/1.4 镜头的主观质量评价系数分布图

Size	3.5x5	4x6	5x7	8x13	11x14	16x20	20x24
1.4	98.0	98.2	97.3	92.3	84.0	71.9	69.4
2.0	97.7	98.0	97.3	95.0	89.4	80.5	70.8
2.8	97.5	98.2	98.0	91.3	85.2	81.2	86.0
4.0	97.3	98.2	98.2	93.3	91.0	94.2	90.6
5.6	97.1	98.2	98.2	93.3	91.0	94.2	90.6
8.0	97.1	98.2	98.2	93.3	91.0	94.2	90.6
11.0	97.1	98.2	98.2	93.3	91.0	94.2	90.6
16.0	97.1	98.2	98.2	93.3	91.0	94.2	90.6

徕卡 135mm/1.4 镜头的主观质量评价系数分布图

Size	3.5x5	4x6	5x7	8x13	11x14	16x20	20x24
1.4	98.0	98.2	97.3	92.3	84.0	71.9	69.4
2.0	97.7	98.0	97.3	95.0	89.4	80.5	70.8
2.8	97.5	98.2	98.0	91.3	85.2	81.2	86.0
4.0	97.3	98.2	98.2	93.3	91.0	94.2	90.6
5.6	97.1	98.2	98.2	93.3	91.0	94.2	90.6
8.0	97.1	98.2	98.2	93.3	91.0	94.2	90.6
11.0	97.1	98.2	98.2	93.3	91.0	94.2	90.6
16.0	97.1	98.2	98.2	93.3	91.0	94.2	90.6

彩图 9 镜头主观质量评价系数分布图



彩图 11 分辨率测试卡

目 录

前言

1 光学的基础知识

光的本性与光波/2

光的波粒二象性/2 光的波动性/2 物体的颜色/6

几何光学的基本定律/6

光线沿直线传播/6 诸光束独立定律/7 光的反射定律/7

光的折射定律/9 光的可逆性/10

光度学简介/11

发光强度与亮度/11 照度/12 照度与亮度的关系/12

物体对光的吸收/14 习题/16

2 摄影光学基础

有关镜头与透镜的基础知识/20

透镜与摄影物镜/20 透镜与物镜的特征点与特征面/20

镜头的通光能力与光圈/24 镜头的视场与像场/26

摄影物镜的实用光学计算/28

图解法/28 有关算法的基本公式/32 快速心算法/35

微距状态的近似计算/37 精确计算/39 简易光学计算小结/40

镜头的像差/41

单色像差/41 色差/44 像差的小结/46

景深与焦深/47

景深与焦深的基本概念/47 控制景深的基本方法/49

影响景深的因素及景深分布的规律/53 景深控制的高阶应用/57

景深的应用/61

微距摄影/61

微距镜头与普通镜头的微距功能/62 近摄接圈与近摄皮腔/66

近摄镜/70 增距镜/73 倒装镜头/76 小结/77 习题/80

3 摄影镜头的分类、使用与维护

镜头按焦距段分类/88

镜头按视场角(焦距段)分类/88 鱼眼镜头/90 超广角镜头/92

广角镜头/93 标准镜头/95 中焦镜头/97 长焦镜头/98

超长焦镜头/99 变焦镜头/100

其他可改变镜头焦距的附加镜头/102

镜头的其他分类方法/103

按镜头接口分类/103 按镜头孔径分类/110

按镜头调焦的方式与类型分类/110

特殊光学结构与用途的镜头/113

不同焦距镜头的摄影特性/121

同一位置不同焦距/121 不同距离主体同大/127

短焦与长焦镜头的表现特点/131

两种镜头的拍摄环境与拍摄条件/135

镜头的使用维护与保养/136

使用镜头一般的注意事项/136 镜头的维护/138

镜头的保养/139 习题/140

4. 摄影镜头的评价、选择与测试

144

镜头综合光学素质的检测与评价/145

分辨率/145 镜头的锐度与调制传递函数/148 杂光/154

照度均匀性/156 色贡献指数(色增生指数、色彩还原)/157 畸变/158

镜头的评价与选择/160

选择镜头的焦距段/160 选择镜头的最大相对孔径/162

选择镜头的光学素质/163 选择镜头的易用性/166

选择镜头的耐用性/172 选择镜头的性能价格比/173

镜头与附件的兼容性和扩展性/176 专业镜头与优质镜头/176

小结/177

镜头的检查与测试/178

镜头的目视检查/178 镜头简易的定性测试/180

镜头的某些定量测试/182 测试手振的极限与三脚架的抗振性/187

测试机身调焦误差对镜头孔径的限制/188 习题/190

附录/193

常用摄影镜头与相机外文名
称及中文译名对照表/193
参考书与参考资料/198

**Guangxue
de jichu
zhishi**

1

光学的基础知识

□ 本章介绍了关于光的本质、几何光学与光度学最基本的知识与概念，是今后学习摄影光学及阅读摄影技术资料的理论基础。

光的本性与光波

我们知道，没有光线，人们将无法看到任何景物；没有光线，照相机也不能记录任何影像。因此，没有光也就没有摄影。准确地处理光线是照相机最基本的功能；正确地利用与控制光影是摄影师需要掌握的最基本的技术。要想熟练地使用手中的相机、进一步提高摄影的技能，每个摄影人都应该了解一些最基本的光学知识。

光的波粒二象性

早在战国时期，我国的《墨经》中已经正确地描述了有关光线与镜面成像的若干规律。两千多年以来，人们经过反复的探索、研究与争论，才逐渐认识了光的本性。科学家发现：在研究光与其他物质的相互作用（例如用测光元件测光、感光胶片曝光）及光的发射与吸收等现象时，光体现为由大量的微小粒子——光子组成；但是在研究光的传播中（例如光的折射、干涉、偏振等现象），光又体现为一种波动——光波。现代光学认为光也是一种物质，它的粒子性与波动性正是它的两种属性，只是在不同的条件下展示出不同的特征。对于光的这种特点，我们称为“光的波粒二象性”。

光的波动性

与粒子性相比，光的波动性与我们的摄影活动联系得更密切，因此下面我们将着重介绍光的波动说。

物理光学的研究表明，光波是一种能引起人眼产生视觉的电磁波，与电波、无线电波、微波（雷达波）、X射线等属于同一个家族（图 1-1）。

光在传播的过程中振动的方向与传播的方向垂直，因此光波是横波。光在传播时振动方向（相位）与振幅都相同的相邻两点间的最小距离称为

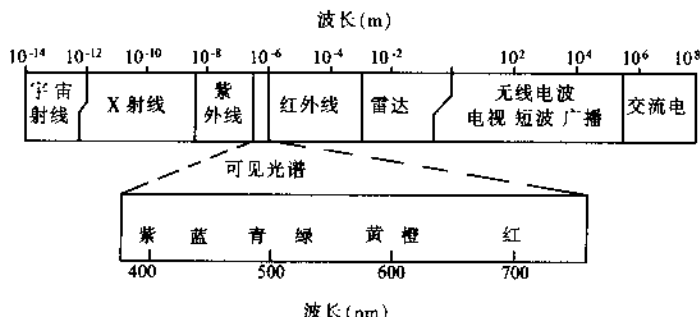


图 1-1 电磁波谱及可见光谱

波长。光波与其他电磁波的主要区别在于波长不同。

光在真空中的速度也与其他电磁波相同，约为每秒 30 万千米。光在空气中传播的速度与真空中的光速几乎相同，光在其他物质中传播时速度将变慢。

◎ 光波的振动方向——混合光与偏振光 普通的光线是由振动方向各异的多种光组成的混合光线。有一种滤光镜只允许特定方向振动的光线通过，称为偏振镜。偏振镜允许光波通过的振动方向称为偏振镜的偏振方向。当普通光线通过偏振镜（图 1-2a）或在多数非金属物质表面反射后（图 1-3），振动的方向会趋于相同，这种振动方向大致相同的光线称为偏振光，如果偏振光中所有光波的振动方向完全一致，则称为“全偏振光”或“线偏振光”（图 1-2a、b）。由于偏振镜可以有效地吸收振动方向与其偏振方向垂直的偏振光（图 1-2b），因此摄影中常用偏振镜消除非金属

物体表面的反射光（图 1-2a、图 1-3）。普通偏振镜透过的偏振光在传播的过程中偏振方向保持恒定，这种偏振镜又称为“线偏振镜”。线偏振镜的代号是 POLARIZER、P.L、PL。

如果偏振光斜射到非金属表面，而且入射角等于或大于某个“临界角（一般非金属约在 55° 左右）”，则仅当光的偏振方向与表面平行时才能被反射（图 1-3b、c），因此可以用偏振镜消除这种反射光（图 1-3b）。但是自动调焦单反相机的测距系统都安装在反光镜箱的下部，通过镜头的光线要经过多次反射才能达到测距传感器上。一旦镜头前面安装了偏振方向不与反光镜平面平行的线偏振镜，则测距传感器将得不到光线（图 1-3c），因而无法测

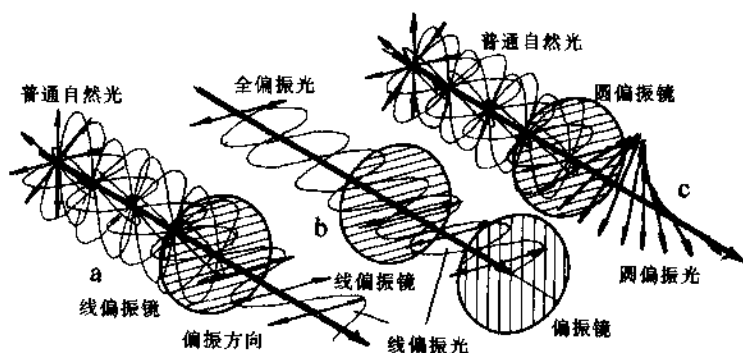


图 1-2 偏振镜对普通自然光与偏振光的作用

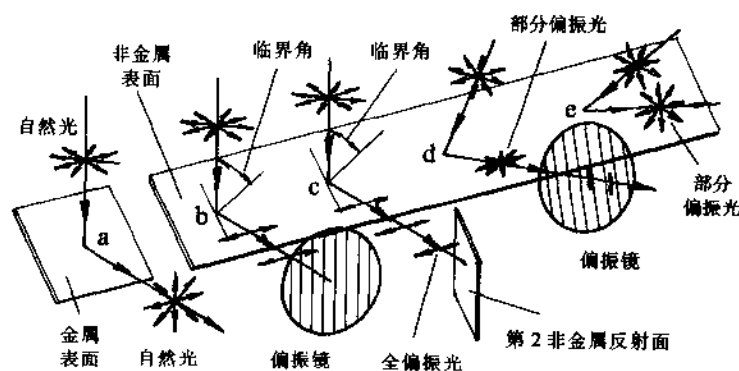


图 1-3 普通自然光在不同反射条件下的偏振状态

距调焦。为此，在自动调焦的单反相机上应当优先使用“圆偏振镜”。圆偏振镜透过的偏振光，其偏振方向在传输中不停地旋转变换（图 1-2c），仍能在反光镜表面反射，以保障自动调焦系统正常工作。圆偏振镜的代号是 CIRCULAR PL、C-P.L、C-PL。

利用偏振镜的特性，我们可以判断偏振镜的质量。将两个线偏振镜叠合旋转，透明度将发生变化。若透明（偏振方向相同）时越亮，变暗（偏振方向垂直）时越暗，则偏振特性越好。可以用一片已知的线偏振镜判断未知灰色镜片的类型：若待测镜片两面与线偏振镜叠合均无偏振效应，则是灰镜；若无论哪面与线偏振镜叠合均有偏振效应，则是线偏振镜；如果待测镜片仅有一面与线偏振镜叠合有偏振效应，则是圆偏振镜，而且此时与线偏振镜叠合的表面应是圆偏振镜指向物方（前方）的表面。检验偏振镜时除了要有明显的偏振效应外，还应注意在透过率变化的过程中透过的光线不能有明显的偏色。

◎ 光谱及其应用 不同波长的光有不同的颜色，将各种颜色的光按波长排列，形成光谱，其大致的分布规律如图 1-1 及彩图 1 与表 1.1 所示。由于光从某种颜色转换为另一种颜色的过程是连续变化的，并无明确的分界，因此表 1.1 也只是一个大致的范围。图中波长的单位是纳米（nm）。今后我们在研究人眼、感光胶片或光敏元件对色光的灵敏度、滤色镜的特性及镜头的色差等诸多问题中，还将频繁地接触与处理色光，因此必须牢记各主要色光所对应的波长，并熟悉彩图 1 及表 1.1 所示的光谱上各种色光按波长分布的规律。

表 1.1 单色光的波长与颜色分布对照表（波长单位 nm）

颜色感觉	紫	蓝	青	绿	黄绿	黄	橙	红
波长分布	380~430	430~470	470~500	500~530	530~560	560~590	590~630	630~770

下面让我们通过几个例子说明光谱分布对摄影人的重要性。

● 例 1：人眼对不同色光的感受能力。

图 1-4 是表示人眼对不同波长（颜色）光线相对敏感程度的曲线，称为人眼的光谱光视效率曲线，又称为“视见函数曲线”。从曲线中可见，在明亮的光线下，人眼对 555 纳米的黄绿光最敏感，而在暗光下，则对 507 纳米的青绿光最敏感，因此在暗光下拍摄的彩色照片如果颜色轻微偏蓝，给人的印象更真实。无论在强光或弱光下，人眼对红光与蓝紫光线的灵敏度都很低，当光波的波长小于 380 纳米、大于 780 纳米时，人眼已经不能察觉（多数人甚至仅能感受 420~700 纳米的色光），因此分别称为紫外光与红外光。

在摄影中，一般的感光元件与通用的摄影胶片，对各种色光的敏感程度都必须与人眼的光谱光

视效率曲线尽量接近,才能得到令人满意的结果。

● 例2: 胶片的光谱灵敏度曲线与摄滤光镜光谱透过曲线。

图 1-5a 是全色黑白胶片的光谱灵敏度曲线,表示胶片乳剂对不同色光敏感的程度。从图中可见一般黑白胶片对蓝紫光线十分敏感,而对 550 纳米的黄绿光却不敏感,致使拍摄的景物中蓝天因曝光过度呈白色,绿树因曝光不足呈黑色,与人的视觉感受不同。因此,我们在拍摄中有必要使用黄滤光镜或黄绿滤光镜,它们对不同波长色光透过率的分布曲线(曲线越高表示该波长的色光透过越多)如图 1-5b 所示,称为滤光镜的光谱透过曲线。使用这些滤光镜之后,由于它们在短波端透过率很低,大量吸收了蓝紫光线,使达到胶片的蓝紫光线大幅度减少,令胶片所接受各种色光的比例(图 1-5a 中的虚线)接近人眼的视觉光谱效率曲线,压暗了蓝天与红色,提亮了绿树的影调,从而可以得到更为真实自然的黑白照片。

● 例3: 光源的相对光谱能量分布曲线与光源校正滤光镜。

仅由一种波长组成的光称单色光,单色光呈现最纯净饱和的颜色。我们平时所见到的光源所发出的光都是由多种色光组成的,这种光称为复色光。人们用相对光谱能量分布曲线来描述一个光源中各种色光按波长分布的规律。摄影最主要的自然光源——日光含有各种波长的光线,而且各种色光的能量比较接近(图 1-6a),它的光谱能量分布曲线是一条连续平缓的曲线。多数人造光源光谱能量分布与日光不同,使被照明的物体呈现的颜色偏离日光下的色彩。其中有的光源(如白炽灯)光谱是连续的,有些(如荧光灯)则是不连续的(图 1-6a)。我们也可以用各种滤光镜消除人造光

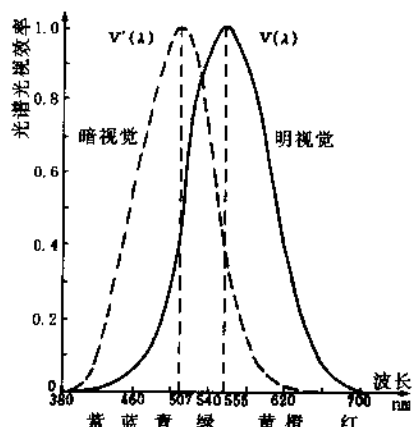


图 1-4 视觉的光谱光视效率曲线

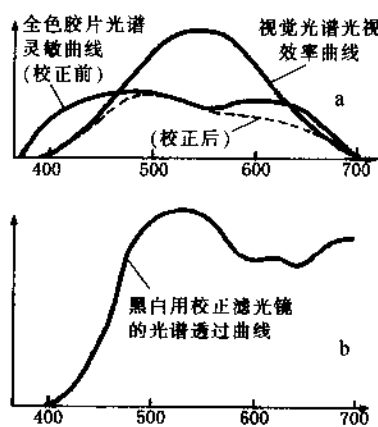


图 1-5 黑白胶片感色性的校正

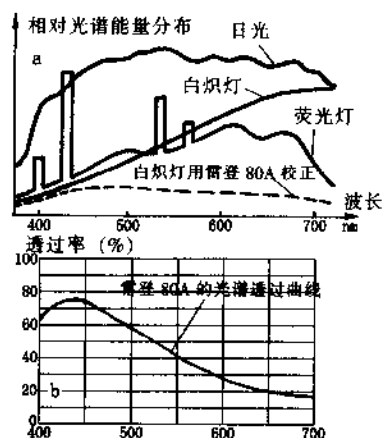


图 1-6 光源的相对光谱能量分布及校正

源过多的色光成分，得到接近日光照明的色彩效果。例如在白炽灯下用蓝色的雷登 80A 滤光镜吸收多余的红光（图1-6b），得到近似日光的能量分布（图 1-6a 中的虚线）。我们也可以用荧光灯滤光镜吸收荧光灯多余的黄绿光，但是由于任何滤光镜都无法完全吸收荧光灯突出的蓝光与黄光，因此用这种非连续的光源很难精确地模拟日光。

物体的颜色

光的颜色，物体的颜色，色光的本质，透明物体与不透明物体形成不同颜色的原因，同一个物体在不同色光之下形成的颜色……这些都是光学的重要内容，也是摄影人必须掌握的基本光学知识。由于本书未涉及这些内容，此处从略。感兴趣的读者可以参阅本系列丛书《摄影滤镜》第一章滤镜的光学常识中相关的内容。

几何光学的基本定律

摄影工作中所涉及的光学计算都是建立在几何光学基础之上的，几何光学主要由五条定律组成。

光线沿直线传播

光线在均匀媒质中是按直线传播的。从一个点光源发出的光是以该点为起点向周围空间发出的射线。若物体某点发出的光线经过光学系统的处理又相交于空间的另一点，则此交点称为原物点的实像，简称原物点的像。若在此处放置一个屏幕，将能在屏幕上看到这个像点。若某物点发出的光线经过光学系统的处理后，光线的反向延长线交于空间的一点，此时我们的眼睛觉得光线是从此点射出，视觉上感到此处有一个像点。但是若在此处设置一个屏幕，由于光线实际上并未达到此处，所以不能形成影像，因此将此交点称为原物点的虚像。实像可以在投影屏幕上成像，虚像则仅能用眼睛观察。但是无论实像还是虚像，只要对着像点调焦，都能用照相机将此像点记录在胶片上。光线按直线传播的规律是几何光学的基础，小孔成像的现象就是这一定律最直接的证明。