

彩色感光测定原理

〔美〕罗·特·赖恩 主编

唐志健 译

中国电影出版社

1983 北京

PRINCIPLES OF
COLOR SENSITOMETRY
RODERICK T. RYAN, EDITOR

本书根据美国电影电视工程师学会 1974 年第三版译出

内 容 说 明

本书概要地介绍彩色感光测定方法及其所依据的原理和所使用的各种仪器，目的在于使应用这门科学的彩色电影摄影领域的工作人员对它的现状有全面的了解。

本书内容共分七章。第一章概述彩色感光测定的基本原理和数学基础，第二、三两章分别叙述彩色感光测定的曝光和冲洗加工，第四章论述影像密度的定量评价，第五章介绍密度计的设计原理，第六章和第七章讨论测定结果的诠释和统计特性。最后，在附录中还列举了彩色合成密度和分析密度的变换方法。

本书适合于电影制片、摄影、洗印、录音专业人员，感光材料和感光仪器制造厂所，照相馆和图片社从业人员，电影学院及其它高等院校各有关专科的学员以及一般业余摄影爱好者学习、参考之用。

彩色感光测定原理

【美】罗·特·赖恩 主编

唐志健 译

*

中国电影出版社出版

北京印刷一厂印刷 新华书店发行

*

开本：850×1168毫米 1/32 印张：4 1/4 字数：88,000

1983年10月第1版北京第1次印刷 印数：1—7,700册

统一书号：15061·195 定价：0.69元

引 言

彩色摄影是一项要求严格、需要付出极大努力的工作。当我们在电影银幕上看到优美而显然是正确的彩色再现时，我们所看到的是一系列精细工作的成果。这种工作是不允许反复试验的，因为误差可能贯穿许多方面，出现在很多地方，不能靠试验来发现和克服。从经济实惠方面来考虑，彩色摄影没有多少凭猜测甚至凭估计来操作的余地。它要求凭测定来操作，测定所获得的结果，必须是对所用材料的特性、洗印单位加工的效果以及所形成的照相影像的性质等获得了定量的知识——这些知识必须足够准确、全面，保证能产生最佳效果。详细说明这种测定及其方法的科学就是摄影感光测定。

虽然摄影感光测定所涉及的主要问题是确定摄影曝光和所成影像之间的定量关系，但它还涉及整个摄影过程，即从景物拍摄开始，直至放映观察的全部过程：研究曝光情况，规定胶片应该接受和实际接受的辐射能的质和量；检验并控制已曝光感光材料上形成可见影像的化学处理过程；测量经过冲洗加工的影像，用对成品的应用或操作过程的调整和稳定来说最有效或最有意义的术语来确定影像的特性或成份。最后，感光测定还为观察者提供了一种手段，使他们在画面质量的判断和摄影材料的物理性能之间找到相互关系。所有这些工作都是用感光测定的专门技术和工具来完成的，测得的所有结果均以感光测定专用的单位和术语来表示。

彩色摄影使感光测定增加了适用于这一新任务的新方法、新仪器和新术语，并从而形成了一门新的科学，即彩色感光测定。

彩色感光测定方法大部分是根据黑白材料感光测定中人所共知的基本原理建立起来的，一部分原理是新的。本书的目的就在于概要地介绍这些原理，叙述彩色感光测定的方法和仪器，使应用这门科学的彩色电影摄影领域的工作人员，对它的现状有全面的了解。论述并不详细，有些地方为了易于理解而放弃了严密性，但是力图使本书所包括的内容比较全面。

彩色感光测定用于电影工业主要有两个方面，即对所用工艺技术和摄影材料的评价，以及对它们的控制。作为一种评价工具，感光测定的意义在于给彩色胶片影像作出简单明了的客观描述，从而间接地对胶片特性和加工工艺或印片系统作出客观描述。感光测定提供了讨论有关的质量和性能的语言。这些客观描述特别有利于用摄影胶片与一定的理想、一定的实用目的、公差容限或某一代用产品作比较。

在操作控制中需要另外一些感光测定方法，特别是在采用校正措施以尽量减小有害偏差来实行控制的场合。制造厂家需要用这种控制来保持产品的一致性；洗印单位需要用控制方法来保证同一材料连续加工的重复性。

自然，感光测定方法在不同应用场合中采取的具体程序是多种多样的，然而有一个基本程序几乎所有测试都通用，那就是：先给胶片样品以一系列的曝光，然后进行冲洗加工，用某种密度测试技术测定所得到的一系列影像，最后把测得的数据整理成适用于随后进行诠释的形式。作者试图按上述顺序分别阐述各个步骤，讨论每个步骤所包含的基本概念，及其在适合电影领域的实践过程中的体现。

许多基本原理和一些具体方法，也适用于其它类型的彩色胶片，但对具有不透明支持体的彩色材料，比如彩色相纸，则未予考虑。

目 录

引言	1
第一章 感光测定的基本原理	1
感光测定的数学基础	2
密度的概念	6
第二章 感光测定的曝光	9
感光仪	9
感光仪的类型	10
梯级光楔	11
单层选择性曝光	14
辐射的光谱质量	14
美国国家标准	15
控制声道的曝光	15
市售仪器	16
印片机用作感光仪	20
第三章 感光测试的冲洗加工	24
感光测定加工	24
化学控制	25
与生产加工的比较	26
对比乳剂	26
第四章 影像密度的定量评价	30

密度计	31
彩色合成密度测定法	32
散射效应	33
光谱加权	33
印片密度	34
其它材料的印片密度	35
色度密度和亮度密度	35
任意三滤色片密度	37
光谱密度	38
彩色分析密度测定法	39
光谱分析密度	40
等效中灰密度	41
等效中灰印片密度	43
系统误差	44
合成密度测定与分析密度测定	44
 第五章 密度计设计原理	 46
通用仪器	46
基本组件	47
光源	47
光谱选择器：滤色片	48
光电彩色密度测定的响应函数	49
光谱选择器：色散系统	60
光楔	61
接收器	61
指示器	63
记录器	63
几何设计因素	64
合成密度测定系统	64
分析密度测定系统	66
市售仪器	68

第六章 测定结果的诠释	74
加工调整	74
放映正片的评价	75
灰色级谱曝光	75
彩色合成密度	76
彩色分析密度	79
非灰曝光	80
印片评价	81
加工控制	83
加工监控系统	83
密度计	84
负性控制光楔片的使用	84
正性控制光楔片的使用	90
印片机的调整和控制	96
彩色复制	97
保护性翻正片	98
特殊复制要求	99
闪光曝光技术	100
非常规加工	101
彩色感光测定的其它应用	101
声带评价	102

第七章 彩色感光测定的统计特性	104
测定结果的统计偏差	104
各种偏差的起因	105
多因素实验	105
表示数据的统计方法	106
频数图	106
控制图	107
控制范围	109
标准偏差的意义	109

标准偏差的计算	111
附录 合成密度和分析密度的变换关系	113
重叠染料影像的密度	113
以染料浓度为函数的密度	115
从等效中灰密度求合成密度	116
从合成密度求等效中灰密度	118
非单色合成密度	120
修正的变换方程	120
计算装置	121

第一章 感光测定的基本原理

摄影感光测定是测定摄影材料感光度的科学。广义地讲,感光材料的所有感光特性,包括曝光和显影,都属于感光测定的范畴。

在照相干板问世之前,运用感光测定方法的人们,仅限于感光材料的制造者和摄影科学研究者。在此期间,摄影术已发展到有业余爱好者参与摄影的程度,摄影工作者开始感到需要有一种方法来测定他们所使用的摄影材料的感光度。

在这些业余爱好者当中,有两位在英国联合制碱公司工作的朋友,弗尔丁南德·赫特和弗罗·德利菲尔德(Ferdinand Huter and Vero Driffield),他们对摄影有着共同的爱好。作为科学家,他们对过去收集到的有关这门科学的定量资料如此贫乏而感到大为惊讶,决心做一些工作来摆脱这种混乱状态,理出一些头绪来。他们把找出一种准确测定日光的光化效率的方法作为首要任务,这项研究工作的直接成果,是研制成功了一台他们称之为“光化线强度记录器”的曝光量计算器。远为重要的成果是它的副产品,即他们发表的论文《照相干板的光化学研究及测定其感光度的新方法》,为现代感光测定奠定了基础。

这篇论文中探讨的问题有:

1. 曝光量和阻光率之间是什么关系?
2. 什么是正确曝光?
3. 乳剂感光度如何用一个简单数字来表示?
4. 显影的作用是什么?

5. 显影程度如何测定?

6. 什么是正确显影?

直到今天也没有发现赫德他们所做的研究工作有丝毫实质性错误，只是由于新材料的引进，摄影的应用场合不断增加，他们所做的工作已经大为扩展。

感光测定的数学基础

在讨论赫德和德利菲尔德研究成果的实际应用之前，我们先抛开正题，试图避免当读者拿起一本关于感光测定书籍时所碰到的一个问题，即数学问题。过去出版的课本一般都假定读者具备一定的数学知识。实际上，相当多的读者要么从来就没有机会学到这些必要的知识，要么虽然曾经熟悉这方面的知识但现在已经忘记。本章的做法是假设读者对必要的基础知识一无所知，然后逐步讲到实用摄影中包括的内容。为了使感光测定更加通俗易懂，作者甘冒烦琐之嫌，决定在开头部分从对数的由来讲起。

感光测定是摄影术的定量用语，或者称为“度量用语”。许多人对数学有一种心理上的障碍，特别在用到数学符号时更是这样，这是人们自己给自己设置的一种不必要的障碍。感光测定或随便什么有关定量测定的学科中使用的数学符号，只是为了便于处理问题而想出来的简写形式。例如，符号 0 的使用，大家都知道它代表零，即什么也没有。在我们熟悉的数制中，如果以 0 开始，加上一个单位数，就得到 1，它就是我们的数制中基本整数的符号。如果我们不断加上这个单位数，就得到一序列的数，每一个数增加后都有一个符号：

$$0 + 1 = 1$$

$$1 + 1 = 2$$

$$2 + 1 = 3$$

$$3 + 1 = 4$$

……等等。这一列数可以更简便地排成下列顺序：

0 1 2 3 4 5 6 7 8.....

显而易见，这一列数有规律性，马上可以判明这一列数的构成方法。给定前面几个数，谁都能接着写出无穷个同类的数。这一列有规则的数称为级数，级数中的各个数称为项，下一项比前一项大一个单位数。可以想象，这一系列数能够用来表示线段的长度，从一点开始，这一点可以看作是长度为零的线段，所以这类级数称为线性级数。这种级数的另一个名称是算术级数，这两个名称可以通用。建立级数时每次加上的数称为增量。

用某一给定的称为比例因子的数乘以每一项，就可构成另一类级数。如果此级数要以 0 开始，我们发现这项工作是不能完成的，因为任何数乘以 0 都得 0。如果这项新级数以 1 开始，我们就能看到，只要不以零和 1 为比例因子，就会产生具有不同数值的一个级数。

如果我们只限于考虑整数，那么下一个可选择的数就是 2，从而可以得到下面的级数：

1 2 4 8 16 32 64 128 256.....

为产生这个级数，使用了常数因子 2。显然，每一连续项都是用前一项乘以比例因子后得到的。正象我们前面讲过的，第一种级数可用以代表线段的长度，称之为线性级数。同样，我们说第二种级数可用以代表矩形的面积，因而称之为几何级数。而且，既然我们知道第三项、第五项……等各项都是 2 的平方及它的倍数，所以又称之为二次级数。几何级数的基本特性之一是，相邻项的变化具有恒定的比例，可以用另一种数字符号即所谓 2 的幂次来标记这种级数，如：

$$2 = 2 \text{ 乘一次方} = 2^1$$

$$4 = 2 \times 2 = 2^2$$

$$8 = 2 \times 2 \times 2 = 2^3$$

$$16 = 2 \times 2 \times 2 \times 2 = 2^4 \text{ 等等}$$

右边一列中，数 2 右上方的小号数字称为幂或指数，代表一

种简写体制，用以表示某数(此处为 2)自乘多少次。

现在我们把前面讨论过的两种级数相互联系起来写出，再把几何级数按 2 的幂次重写一行：

0	1	2	3	4	5	6	7	8 (算术级数)
1	2	4	8	16	32	64	128	256 (几何级数)
2^0	2^1	2^2	2^3	2^4	2^5	2^6	2^7	2^8 (以 2 的幂次表示的几何级数)

检查一下各个指数就可以明白，它们构成一个算术级数，和我们开始讨论的算术级数一模一样。指数运算的那个数(此处为 2)称为底。几何级数的第一项表示为 2 的幂次的是 2^0 ，这个符号对没有数学训练的读者是陌生的，但是在讨论了指数运算的一些规则后，就会明白这个符号的意义及由来。

将几何级数按普通形式的数和以 2 为底的指数来表示：

1	2	4	8	16	32	64 (几何级数)
2^0	2^1	2^2	2^3	2^4	2^5	2^6 (以 2 的幂次来表示的同一个级数)

假定要把 16 和 4 相乘，我们想到 4 等于 2^2 ，16 等于 2^4 ，如果把指数 2 和指数 4 相加，得到的指数为 6，再参照上面一行，我们找到相应于 2^6 的数是 64，这个数就是 4 和 16 的乘积。由此可得到：

规则 1 几何级数中任意两个数相乘，只要将它们相应的底的指数相加，则指数的和等于对应于乘积的底的指数。

规则 2 几何级数中一个数被另一数相除，只要从对应于被除数的底的指数中减去对应于除数的底的指数，则指数差等于对应于商的底的指数。现在我们就能理解了，如果 4 被 4 除，就从指数 2 中减去指数 2，得到的指数值为 0，已知 4 除以 4 等于 1，所以用底 2 自乘 0 次(2^0)等于 1(同理，任何底自乘 0 次都等于 1)。

规则 3 任意一个数要自乘几次，可以找出对应于此数的底的指数，用此指数与自乘次数相乘，其乘积就是要求的数值所对

应的底的指数。例如求 8 的平方，对应的 2 的指数为 3，用 3 和 2 相乘，得指数 6，对应的数为 64。

规则 4 某数要开根，可以用对应于此数的指数与根数相除。例如，开 64 的立方根，对应于 64 的 2 的指数为 6，6 被 3 除，得指数 2，表示答数为 4。

我们已经弄清了几何级数和对应的算术级数两者的相互关系，并利用此关系解决了一些问题，在数学中这种关系的定义为：几何级数中的数若能与算术级数中的数逐项相关，那么算术级数中的数就称为几何级数中的数的对数。在上例中：

1	2	4	8	16	32	64	(几何级数)
0	1	2	3	4	5	6	(算术级数)

算术级数中的数是几何级数以 2 为底的对数。

对数是苏格兰人约翰·纳比(John Napier)发明和命名的，是简化算术计算的一种工具。经过二十年的研究工作，他于 1614 年发表了他的计算表，但是他的对数系统使用的底比较复杂。他的朋友和同事亨利·布里格斯(Henry Briggs)提出了一个简化方案，并于 1617 年发表了以 10 为底的对数表。这一概念可用下述级数来说明：

(A)	0	1	2	3	4	5	6	(算术级数)
(B)	1	10	100	1000	10000	100000	1000000	(几何级数)
(C)	10^0	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	(以 10 的幂表示的几何级数)
(D)	0	1	2	3	4	5	6	(单独写出的幂数)

A 行和 D 行都是 C 行的指数，是 B 行中各个数的以 10 为底的对数，就是今天通用的普遍对数。我们说某一个数的 $\log$ (对数)，总是指是以 10 为底的对数。乘、除、自乘、开方的规则可

按前述方法应用：

两数相乘，将两数的对数相加，得到乘积的对数。

两数相除，用被除数的对数减去除数的对数，得到商数的对数。

某数自乘，用此数的对数乘以自乘的次数，得到所求的数的对数。

某数开方(例如求平方根)，用此数的对数被根数相除，得到所求的数的对数。

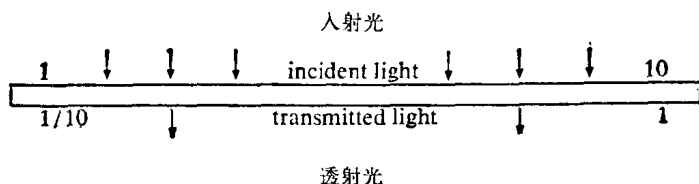
上面列出的简单对数表只包括 1、10 以及 10 的倍数的对数，其它数的对数，譬如说 1 到 10 之间的各个数的对数是多少呢？经过适当的计算，可以看到这些数的对数是以 10 为底的分数指数。

数：	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
对数：	0	.30	.48	.60	.70	.78	.84	.90	.96	1

密度的概念

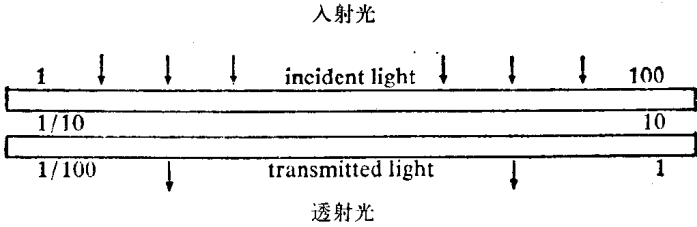
逐步阐明了对数概念后，我们就可以进一步给密度的概念下定义。虽然对已加工的感光测试片上银沉积的测定有多种方法可用，但最有意义的还是根据影像的光透射率所建立的方法，它看来最合乎逻辑。测量系统得到的测值，应当在银沉积变黑——即光透射率变低时，显得更大。这一点看来也是合理的。另外，两个区域的测值之差应当和视觉感受的差别相同或近于相同。测量影像的密度能满足上述要求。密度的定义为光透射率的倒数的对数。

设想一片吸光材料能透射十分之一即 10% 的入射光：



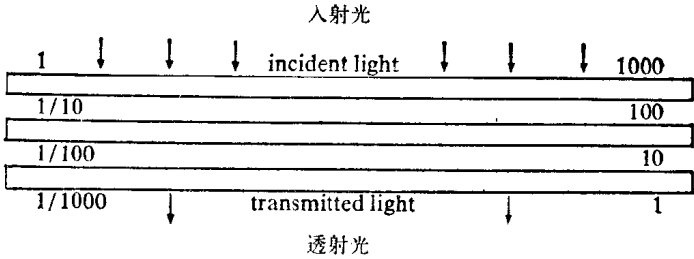
输入一个单位的光强，输出变成 $1/10$ 单位，或者反过来讲，要得到一个单位的输出，需要 10 单位的输入。

如果把两片同样的材料放在一起，如下图：



一个单位的输入，得到 $1/100$ 单位的输出，即要得到一单位输出，需要 100 单位的输入。

三片放在一起，如下图：



一个单位的输入，输出为 $1/1000$ 。要得到一单位输出，输入必须为 1000。

这些数据可列表如下：

层数	单位输入的输出	单位输出所需的输入	第三列的对数
1	$1/10$	10	1
2	$1/100$	100	2
3	$1/1000$	1000	3

赫德和德利菲尔德把这几列数和已加工的照相乳剂银沉积的物理和光学特性联系起来，他们认为第一列的数正比于银沉积中已显影的银量(单位面积的重量)。

第二列原已定义为银沉积的透射率 T 。当然，这些分数值也可用小数或百分数来表示，例加， $1/10=0.10=10\%$ 。

第三列是透射率的倒数(反比例)，称为银沉积的阻光率 O 。

对第四列中的数，赫德和德利菲尔德采用了一个新名词，他们称之为密度 D 。

用符号来表示的定义为：

分数输出=透射率= T

分数输出的倒数= $1/T$ =阻光率= O

阻光率的对数=密度= D

$$D = \log 1/T$$

密度方程中采用透射率 T 的倒数而不用透射率，是为了使银沉积变黑后密度值变大。使用对数函数可这样解释：对数函数更接近于人眼对光强差别的主观感觉，换言之，对光强的等比例变化，眼睛的主观判断是等差变化。

参考文献

1. L. A. Jones, "Photographic sensitometry, Part I," Jour. SMPE, 17: 491—535, Oct. 1931; "Part II," Ibid., 17: 695—742, Nov. 1931; "Part III," Ibid., 18: 54—89, Jan. 1932; "Part IV," Ibid., 18: 324—355, Mar. 1932.
2. Control Techniques in Film Processing, Society of Motion Picture and Television Engineers, Scarsdale, N. Y., 1960.
3. Keith M. Hornsby, Sensitometry in Practice, Henry Greenwood & Co. Ltd., London, 1957.
4. C. E. K. Mees, "The Theory of the Photographic Process, The Macmillan Co., New York, 1954.

第二章 感光测定的曝光

彩色感光测定的基本程序是从受试样品的曝光开始的。由于各种彩色胶片的特性和应用场合各不相同，有关感光测定曝光的一般性讨论只能涉及基本原理而不能深入到具体细节。目前市场上出售的彩色产品包括摄影底片、印制胶片及中间片。有些彩色片按底片加工，有些则按反转片加工。某些印制胶片的设计是专供从分色底片或彩色正片印片之用。各基本片种都有其独特的性能和用途，因而它们的感光测定方法也有所不同。

总的指导原则是，感光测定的曝光应当尽可能和实际使用条件一致。按照这一原则行事，在联系实际摄影效果对感光测定数据进行分析时出现偏差的可能性最小。用一种特制的仪器对胶片进行有规则的、能够复现的曝光，经过冲洗加工，得到的是具有从透明片基经不同灰度直到全黑的一系列阻光率不同的级谱。这种仪器是专门设计的，所产生的级谱其大小恰好足以用适当的测试仪器来测定银沉积和染料沉积。测定结果经整理分析可给加工控制及其它用途提供必要的数据。

感 光 仪

为了给予胶片以一系列已经确知的且能精确重复的曝光量，要用一种称为感光仪的仪器。感光仪的三个基本部分是：

(1) 一个具有恒定光强、规定的光谱能量分布(即彩色质量)的光源；