

光学信息处理讲座

第四讲 银盐记录介质在光学信息处理中的应用

王玉堂 戴建华

(中国科学院物理研究所)

光学信息处理以其速度快、信息容量大、结构简单、可以同时完成二维或多通道运算等优点而被人们所重视，并已成为现代光学的重要组成部分。光学信息处理的基本装置可以分为以下几个主要部分：光源、输入转换器、光学处理系统以及输出转换器。目前，输入转换器主要通过感光胶片将输入信号或图象送入处理系统。光学处理系统是由透镜或其它全息光学元件构成的模拟运算系统，此系统中的空间滤波器是光学信息处理系统中的关键元件，必须根据具体课题的要求进行设计并用记录介质或其它材料来制备。输出转换器一般是用记录介质把处理结果记录下来，或通过摄像管或 CCD 器件转换成电信号输出。不难看出，记录介质在光学信息处理中起着重要的作用。

随着材料科学的发展，目前在光学信息处理中，可以使用的记录介质种类较多。若以银盐材料为一大类，则其它材料统称非银盐材料。例如重铬酸明胶、光导热塑料、铈酸锂晶体、硫砷玻璃半导体等。但就其记录材料所适用的波长范围、感光灵敏度、动态范围、分辨率以及性能的稳定性和处理过程的简单程度而言，以银盐材料最为成熟。尤其是银盐记录材料具有较高的感光灵敏度和分辨率，这是其它材料无法比拟的。因此，银盐记录材料是目前光学信息处理中最常用的记录介质。本文对利用银盐材料制作输入片、空间滤波器以及利用感光胶片的非线性，实现非线性变换等，作简要的介绍。

一、系统输入平面对胶片的要求

为了不失真地传递输入信息，输入片的制备就必须根据感光胶片的基本特性。下面简单介绍一下感光胶片的特性。

1890年，F.Hurter 和 V. C. Driffield^[1] 证明，显影后胶片的密度 D 与胶片的强度透过率 T 之间的关系满足下式：

$$D = \log \left(\frac{1}{T} \right), \quad (1)$$

并测定了一条描述感光胶片感光性能的曲线，即著名的 H-D 曲线，如图 1 所示。由图可见，感光胶片的曝光密度与曝光量对数之间的关系可分为三个区域：曝光不足区、线性区及曝光过度区。在具体的应用中，应根据不同的需要选择不同的区域。其中线性区是通常照相术中使用的区域，其直线斜率称为胶片的 γ 值，是胶

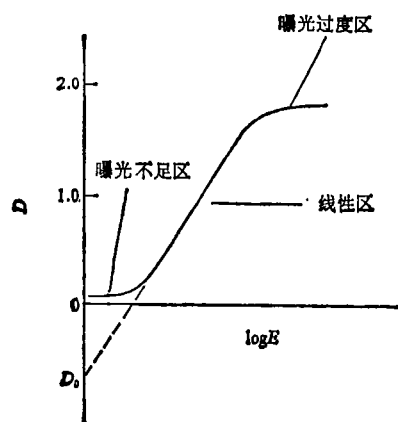


图1 感光胶片的 H-D 曲线

片反差强弱的量度,也是反映胶片特性的重要参数.影响 γ 值的因素较多,除了胶片的类型以外,还有显影液的种类、性能和浓度,显影温度、时间及搅拌条件等.在胶片的处理过程中,通过对以上因素的控制,即可达到控制 γ 的目的.

1. 非相干处理系统

在非相干处理系统中,要求胶片的强度透过率正比于入射光强.由图1可知,在H-D曲线的线性区有:

$$D = \gamma \log E - D_0, \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式可得:

$$T_n = K_n \cdot I^{-\gamma_n}, \quad (3)$$

式中 T_n 为负片的强度透过率, I 为入射光强度, K_n 为常数.显然,无论胶片的 γ 取何值,入射光强与显影后强度透过率之间的变换都是高度非线性的.因此,只有在 $\gamma_n = -1$ 的条件下,(3)式的 $T_n = K_n \cdot I$.此时胶片的强度透过率与原物的强度分布成正比关系.为此,可以采用两步翻拍处理.首先,用通常的方法制作一张负透明片,然后,用此负片透过的光使第二张胶片曝光,最后的结果为

$$\begin{aligned} T_p &= K_{n_2} (I_0 \cdot T_{n_1})^{-\gamma_{n_2}} \\ &= K_{n_2} \cdot I_0^{-\gamma_{n_2}} \cdot I^{(-\gamma_{n_1})(-\gamma_{n_2})} \cdot K_{n_1}^{-\gamma_{n_2}} \\ &= K_p \cdot I^{\gamma_p}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 K_p 为正常数, γ_p 为两步翻拍过程所得到的总 γ 值. $\gamma_p = \gamma_{n_1} \cdot \gamma_{n_2}$.只要 $\gamma_p = -1$ 就满足要求了.也可以通过反转显影处理来实现 $\gamma_p = -1$ 的要求.

2. 相干光处理系统

胶片用于相干光学系统输入面时,应当提供的变换是将曝光期间入射光强变换成显影后透射光的复振幅.一般的待处理图象是在非相干光成像系统得到的,因此它是以强度表示的.而相干光处理系统对光场的复振幅是线性的,对光场的强度则是非线性的.因此,胶片在相干光系统作输入片时,须控制胶片的 γ 值,使其满足振幅透过率正比于原图象光强分布的关系.

我们知道,胶片振幅透过率完整的表达式

为

$$\tau(x, y) = + \sqrt{T(x, y)} \cdot \exp[i\phi(x, y)], \quad (5)$$

式中 $\phi(x, y)$ 主要是由胶片乳胶厚度变化和显影后银粒密度的变化引起的相移.若忽略相移(可用液门消除厚度变化的影响),振幅透过率 $\tau(x, y)$ 可以简单定义为强度透过率 $T(x, y)$ 的正平方根,即

$$\tau(x, y) = + \sqrt{T(x, y)} = K \cdot I^{-\gamma/2}. \quad (6)$$

由(6)式可知,只有当 $\gamma = -2$ 时,胶片的振幅透过率才与曝光期间入射光强成正比关系.可以通过两个途径实现这一要求.

(1) 两次翻拍法

为了使曝光量的动态范围最大,在第一次翻拍时,应选择 $\gamma_1 = \frac{1}{2}$,然后用此负片再翻拍一次,选择 $\gamma_2 = -4$,使 $\gamma_1 \cdot \gamma_2 = -2$,即得到 $\gamma = -2$ 的正透明片(从H-D曲线可知,对于负片 γ 为正值,因斜率为正.对于正片 γ 为负值).

(2) 反转显影法

通过反转显影处理,一次得到正片,只需控制显影条件,使 $\gamma = -2$ 即可.反转显影与两步翻拍法相比具有更大的线性动态范围,因此所给出的最后结果畸变较小.

在离焦模糊图象处理工作中,输入片的制作可采用反转显影法.使用胶片为GEVAERT DUPLO ORTHO,选择合适的曝光条件,使反转显影后图象密度位于H-D曲线的线性区.具体处理步骤见附录I.显影温度19°C,搅拌条件82次/分.结果 $\gamma = -2$,线性区密度范围 $\Delta D = 0.6 \sim 3.5$.满足实验要求.

根据我们的实验情况,对反转显影要注意如下几点:(1)第一次曝光应适当加长,与一般制作负片的时间相比,应加长1/4左右,以免损失原摄物体中的强光部分.(2)第一次显影要彻底、充分,以保证未曝光的银盐颗粒形成最后影象的质量.(3)漂白时应注意搅动,使第一次显影的影象均匀漂掉,而且漂白后水洗一定要充分.(4)第二次曝光时间范围较大,但也存在一个最佳曝光量,可通过实验决定.(5)在反转

处理的整个过程中,除第二次曝光外,不能开灯操作。在漂白和定影过程中可用灰黄色安全灯,否则将出现褐色灰雾影响处理质量。(6)若需降低 r 值,只改变第一次显影时间是不够的,必须改变显影液成分或浓度,以使用低反差显影液为好。

应该指出,并不是所有感光胶片都能用于反转显影处理,在没有合适的胶片时,只能采用两次翻拍法制作 $r = -2$ 的输入片。我们用 Agfa 10E75 片在 D-165 (1:25) 中显影 11 分 30 秒制作负片,然后用 Kodak649F 翻拍,在 D-165(1:10) 中显影 8 分钟制作正片,两次显影温度 20°C,搅拌 82 次/分,可得 $r = -2$ 。

二、滤波元件对记录介质的要求

空间滤波是光学信息处理的关键过程,例如像质改善、特征识别等课题,其处理结果的好坏在很大程度上取决于滤波器的制作。滤波器的形式就其功能可分为三大类,即振幅滤波器、相位滤波器以及由二者组合的复空间滤波器。滤波器可以用镀膜方法制备,也可以通过全息方法或用计算机来制备。

1. 相位滤波器

所谓相位滤波器就是对入射光波进行相位调制的元件。早在 1935 年, Zernike 提出的相位反衬法^[2],使用的就是最简单的相位滤波器。它只有一个取样点,其相位调制为 $\frac{\pi}{2}$ 或 $\frac{3\pi}{2}$ 。到 1969 年 L. B. Lesem 等人,制成了一种新型的再现元件——相息图,可以实现任意给定的相位调制。相息图最初只是一种再现元件,由于它与全息图相比衍射效率高,故已成为相位滤波器的一种较好形式^[3]。

目前还没有直接实现相位匹配的方法,主要是利用全息干板漂白时产生乳胶厚度起伏或折射率变化的特性来控制相位。全息干板漂白的一类配方,例如铁氰化钾、溴化铜、溴蒸汽等,其作用的原理是将乳胶中的金属银转换成透明的银盐,从而将干板的密度变化转化成乳胶折

射率的变化,而乳胶厚度变化较小。若乳胶厚度为 d ,折射率为 n ,经漂白处理后折射率变化为 Δn ,则对入射光的相位调制量为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \cdot \Delta n. \quad (7)$$

显然,当 $d \cdot \Delta n \geq \lambda$ 时,即可实现 2π 的相位调制。故材料的最小厚度将由折射率的变化量 Δn 决定。常用的银盐全息干板及硫砷玻璃半导体材料的 Δn 都可以达到 0.1。

我们对常用的几种漂白配方进行过比较^[4],并用溴化铜漂白液制备了用于象质改善的相位滤波器。漂白配方及处理过程见附录 II。

全息干板漂白的另一类配方,如硫酸铜在漂白过程中银粒周围的明胶被鞣化,从而吸水性变小。干燥后与其它区域相比将出现厚度起伏,而折射率变化较小。其厚度起伏的程度由银粒多少决定,从而造成不同密度区域的厚度差。若乳胶厚度为 d ,折射率为 n ,漂白处理后厚度变化量为 Δd ,则对透射光产生的相位调制量为

$$\Delta\phi_T = \frac{2\pi}{\lambda} (n - 1) \Delta d, \quad (8)$$

在反射条件下,

$$\Delta\phi_R = \frac{2\pi}{\lambda} (n - 1) \cdot 2 \cdot \Delta d = 2\Delta\phi_T. \quad (9)$$

我们利用硫酸铜漂白液和 Agfa 10E75, 10E56 干板制备了柱面镜相息图^[5]、三角相位光栅^[6]以及用于实现 Walsh 变换的变换片^[7]等纯相位调制元件。漂白配方及处理过程见附录 III。

上述两种漂白处理各有优缺点。前者的空间频率响应仅受乳胶中银粒大小的限制,因此比较高。实现 2π 相位调制所需曝光密度值较低,便于控制。但是在密度较高时漂白处理后呈灰褐色,所以使透过光衰减较大。后者用两次定影法可以增加透明度,但存在由厚度起伏引起的过渡带造成空间频率响应较低。另外达到 2π 相位调制量所需曝光密度值较高。

利用上面两种漂白处理制备相位滤波器,都要求先测出曝光量 D 与漂白后产生的干涉条纹弯曲量 ΔN 之间的关系曲线,以及曝光密度

D 与曝光时间 t 之间的关系曲线。然后根据滤波器的设计数据,在 $D-\Delta N$ 曲线上查出各取样点的 D 值,在 $D-t$ 曲线上找出对应的 t 值,再进行曝光、处理。我们建立了一套扫描曝光装置,根据滤波器的数据,先设计出扫描Mask,然后进行一次扫描曝光。此方法适用于制备振幅或相位滤波器^[8]。

2. 全息滤波器

用全息方法制备复空间滤波器是全息术在光学信息处理中的成功应用。用全息方法制备的最佳匹配滤波器^[9]、逆滤波器等为复空间滤波器的制作开辟了新的途径。例如,本刊讲座“相干光模糊图象处理”一文中所采用的逆滤波器的制备,其滤波器的形式为

$$T = \frac{1}{|H|}. \quad (10)$$

根据数学表示,这种滤波器可以分两种情况实现:

$$(1) \frac{1}{H} = H^*/|H|^2 = H^*/|H| \cdot |H|^*$$

$$= \frac{1}{|H|};$$

$$(2) \frac{1}{H} = e^{-i\phi}/|H|.$$

对第(1)种情况, H^* 由记录 H 的傅里叶变换全息图来实现,振幅部分 $\frac{1}{|H|^2}$ 由记录 H 的强度分布得到,此时胶片的振幅透过率 $\tau = [|H|^2]^{-\gamma/2}$,只有在 $\gamma = 2$ 的条件下,才能得到 $\tau = [|H|^2]^{-1}$ 。因此,问题归结到在制作振幅滤波时,应满足 $\gamma = 2$ 的要求。我们采用Agfa 10E75干板在D-165(1:4)中显影6分钟,温度19°C,搅拌82次/分,结果 $\gamma = 2$,线性区对应的密度范围 $\Delta D = 0.5-2.6$ 。将 H^* 与 $\frac{1}{|H|^2}$ 迭在一起,即得 $1/|H|$ 。

对第(2)种情况,因胶片振幅透过率 $\tau = [|H|^2]^{-\gamma/2}$,所以需要控制显影条件,使 $\gamma = 1$,则 $\tau = 1/|H|$ 。同时,为了扩展线性区动态范围,我们分别用Kodak 649F和Agfa 10E75双层滤波器合成 $\frac{1}{|H|}$ 。操作过程是:Kodak 649F

在D-165(1:25)中显影6分30秒;Agfa 10E75在D-165(1:25)中显影11分钟,温度为20°C,搅拌82次/分,结果 $\gamma = 1$ 。双层滤波器线性区动态范围 $\Delta D \sim 3$ 。

以上分析表明,在相干光处理系统的某些应用中,严格控制 γ 值是很重要的,根据我们实验的情况,为确保 γ 值的重复,应注意以下几个问题:(1)胶片曝光后应尽快显影处理,暂时不处理应放入冰箱,以免产生潜象作用。(2)配制显影液应准确,每次配液应使用同一批号药品。显影液配好后应密封避光保存,以免氧化。为使药品化学反应充分,新配药液最好在24小时以后使用。药液贮存时间过长或变色都不能再用。(3)药液应在恒温条件下使用(包括停显、定影在内),否则因温度太高会出现颗粒噪声,影响处理结果。(4)严格控制显影、停显、定影时间,特别是显影时间。(5)胶片处理过程中搅拌方式要固定,特别是将高 γ 胶片用于低 γ 时,更应严格控制,否则 γ 值的起伏变化大。

三、胶片非线性特性的应用

1. 利用胶片的非线性特性提高对相似图象的识别能力

对任何相似图象的频谱分析表明,图象间相似部分的信息集中在低频部分,差异出现在高频部分。在图象特征识别工作中,为了提高对相似图象的鉴别能力,需要在频谱平面上突出待测信号和相似图象间的差异。为此,在用全息方法制作匹配滤波器以实现相关运算中,我们利用胶片有限的动态范围,使傅里叶全息图的低频部分过曝光,这样做相当于加上一个低阻滤波器,阻挡了反映相似图象相同特征的低频成分,突出了反映差异的高频成分,从而使自相关与互相关之比有很大提高。利用这个方法识别相似汉字,例如“要”与“耍”,“玉”与“王”等,获得较好结果。

2. 利用胶片 γ 值极高的特性作非线性变换

本刊讲座“半色调方法实现非线性变换”中提到,用半色调预处理方法实现非线性变换的

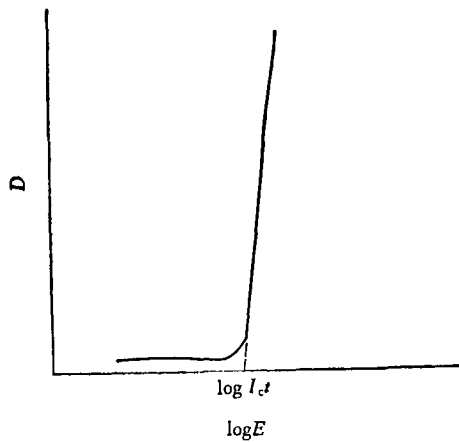


图2 高 γ 胶片的特性

关键,是将待处理的连续色调图象转换为黑白两种密度的二进制图象。实现这一转换的方法是利用胶片 γ 值极高的特性(见图2)。在这里高 γ 胶片起门限作用,使小于限幅密度 D_c 对应的密度分布感光,从而得到透过率为二进制的半色调照片。为获得最好的门限作用,希望胶片的 γ 值愈高愈好。我们在黑白图象假彩色编码工作中,使用Kodak Kodalith 2556及日本小西六片作高 γ 胶片,测得 $\gamma = 11$,使图象的假彩色编码有较好的结果^[10]。

3. 利用胶片的非线性提取密度切片

利用胶片H-D曲线的非线性效应,感光胶片也能制成光学信息处理中的非线性元件。Yu等人^[11]利用胶片的非线性效应实现了对数变换。我们利用胶片的非线性效应和正负片互补条件(即正负片的 γ 值相等),实现了对连续色调图象的密度分割^[12]。

以上我们介绍了银盐记录介质在光学信息处理中的主要应用。还应提到的一点是,将超微粒干板转化为氯化银乳胶后,用偏振光照射能产生二向色性,即维格特效应。目前此效应已被用来产生胶片的对比度反转、图象相减、干涉计量^[13]和光学图象的假彩色编码等^[14]。

光学信息处理与数字处理相比虽然有很多优点,但由于转换元件主要是感光胶片,所以导致光学信息处理的一个严重缺点是非实时处理。因此,研究一种与光学信息处理的高速度

相适应的实时空间光调制器就成了光学信息处理发展的当务之急。这方面的内容,本讲座将有专文介绍。

参 考 文 献

- [1] F. Hurter et al., *J.Soc. Chem. Ind.*, **9**(1890), 455.
- [2] F.Zernike, *Z.Tech. Phys.*, **16**(1935), 454.
- [3] J. P. Kirk, *J. Opt. Soc. Am.*, **61**-8(1971), 1023.
- [4] 王玉堂、郑师海, *激光*, **9**-9(1982), 603.
- [5] 陈岩松等, *激光*, **6**-10(1979), 28; 王玉堂等, *光学学报* **4**-2(1984), 164.
- [6] 王玉堂、樊晓泉, *中国激光*, **11**-2(1984), 78.
- [7] 王玉堂等, *激光*, **8**-1(1981), 30.
- [8] 王玉堂、李秀英, *物理*, **13**(1984), 35.
- [9] A.Vander Lugt, *IEEE*, **10**-2 (1964), 129.
- [10] 张洪钧等, *中华医学杂志*, **62**(1982), 194.
- [11] A. Tai et al., *Appl. Opt.*, **16**-9(1977), 2559.
- [12] 张洪钧等, *物理学报* **29**-7(1980), 956.
- [13] J. M. C. Jonathon et al., *Opt. Commun.*, **28**-1 (1979), 30.
- [14] 张静云,于美文, *光学学报*, **2**-2(1982), 145.

附 录 I

一显	Elon-Phenidone	3'30"
停显	SB-1	30"
水洗		2'
漂白	R-9	3'
水洗		5'
清洁	CB-2	2'
水洗		2'
二次曝光	400W, 1.5m	2'
二显	D-95	3'30"
定影	F-5	10'
水洗		30'

附 录 II

显影	D-19, 20°C	3'
停显	冰醋酸	30"
水洗		2'
定影	F-5	3'
漂白	溴化铜漂白液	7'
水洗		2'
去污	S-13A	1'
水洗		2'
清洁	S-13B	1'

水洗 10'
干燥 室温下自然干燥。

配 方

漂白液 溴化铜 50g, 加蒸馏水至 1000ml
S-13A 高锰酸钾 2.5g, 浓硫酸 8ml 加蒸馏水
至 1000ml
S-13B 亚硫酸钠 10g 加蒸馏水至 1000ml

水洗 流动自来水 2'
定影 F-5 2'
水洗 2'
漂白 硫酸铜漂白液 1'
水洗 2''
二次定影 F-5 45''
水洗 5'
清洁 蒸馏水 2'
干燥 室温下自然干燥

附 录 III

显影 D-19, 20°C 3'
停显 冰醋酸 30''

漂 白 液 配 方

在 700ml 蒸馏水中加入钾明矾 20g, 硫酸钠 25g, 溴
化钾 20g, 硫酸铜 40g, 加蒸馏水至 1000ml, 再加入浓
硫酸 5ml, 加重铬酸钾至饱和。

红外天文卫星 (IRAS)

1983年1月26日,美国、英国和荷兰联合发射了一颗红外天文卫星 (IRAS)。它标志着红外天文学开始进入了空间时代,这一波段第一次可以从空间来进行观测了。由于红外辐射被地球大气阻挡,红外天文学家们一直限于在少数海拔极高处观测。除了在海拔约 4000 米的夏威夷死火山上的 Mauna Kea 天文台之外,大多数天文台在红外区的接收能力受到很大限制,使天文学家们不得不借助一些聪明的办法从红外天空中抽取那怕是很少的一点信息。IRAS 的飞行是以优于 5' 的空间分辨率在 12, 25, 60 和 100 微米波长进行全天普查。在 6 个月的时间内覆盖全天一次,对一些特定区域还计划进行角分辨率更高的巡天。

IRAS 中的焦面仪器被超流液氮冷却到 2.7K。由于液氮的蒸发,该卫星在轨道上的寿命大约只有 11 个月。焦面处的几台仪器是:在 4 个隔开的测光通道上各有一台面积巡视多波段分光计,视场各为 1.2', 低分辨率分光计的直径为 5.0' 和 7.5'。大约 60% 的操作时间用于巡天工作,而其余时间用来观测特定天体。

几乎在 IRAS 运行开始后不久,在 2 月 1 日就得到了一些激动人心的结果。例如,IRAS 是发现慧星 1983D 的第一个卫星,现在该卫星已正式命名为 IRAS-Alcock。这颗彗星曾非常靠近地球,因而也能从地面进行仔细观测,它有可能对太阳系内区尘埃彗星的演化提供重要线索。此后不久,又观察到第二个近地彗星,

IRAS 也被用来对它进行研究。因为国际紫外探测卫星 (IUE) 也正在工作,天文学家们便得到没有先例的机会在紫外和红外波段同时进行观测,这两个波段最容易与地面可见区的观测连接起来。

IRAS 也首次拍摄到仙女座中的漩涡星系 M31 和银河系的近邻星系大麦哲伦云的红外图象。M31 的图象表明,从地面观测到的 21 厘米中性氢强辐射,和环形电离氢区与远红外区看到的亮环发射一致,这些特征是新近连续恒星形成的标志。完成整幅图象用了 36 分钟。

M31 的图象还表明,其核心在 60 和 100 微米处有强发射,但在 21 厘米处则不然。这个星系的总红外光度约为其光学亮度的 1%。大麦云的图象清楚表明许多地方有活跃的恒星形成。

IRAS 最近的观测还发现,在织女星(天空最亮的恒星之一)附近有一红外发射区。有人把发出红外辐射的尘粒盘解释为一个围绕着织女星的太阳系,其大小约为我们这个太阳系的两倍。

全部 IRAS 的观测结果将在 1984 年年底编成星表。不过,为了满足天文界的大量需要和好奇心,自观测开始以来不定期地发行了 IRAS 星表的片断。这将持续到最后的星表出版。

(邹振隆译自 Physics today 1984 年 1 月号)