

减反射膜对摄影镜头彩色还原特性的贡献

齐 钰 张德霞

摘要 本文从彩色摄影的需要出发,依据通用的美国 ANSI 彩色标准,讨论了摄影镜头的彩色还原问题。文中指出镜头玻璃的光谱吸收对彩色平衡的影响,着重分析了减反射膜对改善镜头彩色还原性能的作用,计算了各类减反膜的彩色贡献,给出了用于 10 倍变焦距彩色摄影镜头减反膜系的设计思想、计算方法和结果。结果表明,合理地选择减反膜系和彩色校正膜,可使镜头的光谱透过率和彩色还原特性同时获得改善。

成象质量和彩色还原特性是评价现代彩色摄影镜头性能的两个重要参量。减反膜在这方面具有极为重要的作用。

众所周知,现代摄影镜头已发展成多达几十片光学零件的复杂光学系统。我国目前生产的 10 倍变焦距摄影镜头,包括 16 片透镜、25 个空气—玻璃界面。由于光学设计者对玻璃材质的选择通常以成象质量为目标,对玻璃本身的彩色平衡往往忽视,而将镜头最终的彩色还原寄托于涂镀减反膜。这种认识上的偏见,加上对减反膜彩色贡献缺乏足够的了解,不能合理地使用,其结果造成摄影镜头的“偏色”(一般是定焦距镜头“偏冷”,变焦距“偏暖”)而无法用于彩色摄影。因此,如何正确分析摄影镜头的“偏色”原因,正确认识减反膜的彩色校正作用,解决镜头的彩色还原问题,已成为当前国产镜头,尤其是高倍率变焦距镜头急待解决的重要课题。

有关摄影镜头的彩色还原问题已有文献发表^[1, 2, 3, 4],但对减反膜的彩色贡献和匹配使用问题却涉及很少。本文继蒋筑英同志“关于摄影镜头的光谱透过率”一文,着重分析和讨论了这一问题的解决方法。

一 摄影镜头彩色还原特性的总体考虑

摄影镜头彩色还原特性的评价应依据美国彩色标准 ANSI PH_{3.44}-1970 推荐的彩色贡献 (Color Contribution) 值 (以下略写为 C.C. 值): $8 \begin{pmatrix} +4 \\ -3 \end{pmatrix} - 0 \begin{pmatrix} +1 \\ 0 \end{pmatrix} - 0 \begin{pmatrix} +2 \\ 0 \end{pmatrix}$ 为标准^[1]。C.C. 值的三个数字分别表示镜头光谱透过的蓝、绿、红三个部分相对衰减程度,上标括号中的数字表示其允许偏差的上、下限。数字 8 表明该标准的“蓝路”光谱透过率相对应有较大的衰减,这是考虑到人眼对彩色的感觉、照明体色温的物理特性以及感光软片对光谱感光敏感程度不一等综合效果的经验数字。

我们借助这个 C.C. 值标准,将摄影镜头的彩色还原特性,归结为镜头玻璃和玻璃上减反膜引入的彩色贡献两个方面。这样,就能以玻璃本身的彩色贡献为依据,选择不同彩色特性的减反膜进行校正,并用 C.C. 值来表示其摄影镜头的光谱透过率是否符合彩色平衡。

二 摄影镜头玻璃的光谱吸收对其彩色平衡的影响

摄影镜头的彩色还原特性首先取决于镜头玻璃本身的光谱选择性吸收。计数结果表明，玻璃本身对蓝、紫光的吸收程度较明显地影响着镜头的C.C.值。尤其是新型的高倍变焦距摄影镜头，由于选用高折射率、高色散玻璃，对蓝、紫光吸收过大，其透射截止波长移向长波且带黄色“着色”，因此情况更为严重。

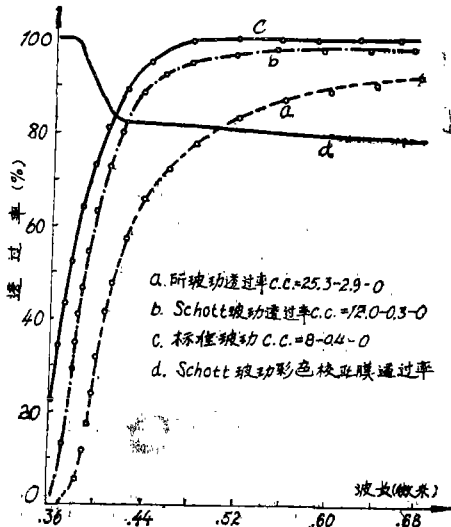


图1 国产玻璃和肖特玻璃的10倍变焦距摄影镜头的无反射光谱透过率

为了分析和计算，将我们设计的I型10倍变焦距镜头所用16块镜片的10种牌号玻璃，测定光谱透过率（5毫米样品）。然后按镜片平均厚度计算出每个镜片的无反射光谱透过率，最后得出镜头的总光谱透过率^[2]。现将其数据绘入图1曲线a。

经计算，该镜头的可见区平均透过率 $\bar{T} = 80\%$ ，短波（0.36~0.44微米）平均透过率 $\bar{T} = 30.7\%$ ，其彩色贡献C.C. = 25.3 - 2.9 - 0。

为比较，选用同上述国产玻璃具有相应折射率、色散和厚度的德国肖特（Schott）玻璃数据，计算镜头的无反射光谱透过率，并绘入图1曲线b。该镜头可见区平均透过率 $\bar{T} = 92.1\%$ ，短波区平均透过率 $\bar{T} = 52.4\%$ ，其C.C. = 12.0 - 0.3 - 0。

比较二种镜头，肖特玻璃镜头透过率高，尤其是短波更明显，其C.C.值基本达到ANSI标准，只是“三色值”的蓝光部分为C.C.值允许范围的上限，使镜头彩色特性略发“暖”；而国产玻璃镜头透过率低，短波更显著，其C.C.值大大超出允差范围使镜头严重发“暖”，甚至达到了难以校正的程度，下面的计算结果将进一步说明这个问题。

比较二种镜头，肖特玻璃镜头透过率高，尤其是短波更明显，其C.C.值基本达到ANSI标准，只是“三色值”的蓝光部分为C.C.值允许范围的上限，使镜头彩色特性略发“暖”；而国产玻璃镜头透过率低，短波更显著，其C.C.值大大超出允差范围使镜头严重发“暖”，甚至达到了难以校正的程度，下面的计算结果将进一步说明这个问题。

比较二种镜头，肖特玻璃镜头透过率高，尤其是短波更明显，其C.C.值基本达到ANSI标准，只是“三色值”的蓝光部分为C.C.值允许范围的上限，使镜头彩色特性略发“暖”；而国产玻璃镜头透过率低，短波更显著，其C.C.值大大超出允差范围使镜头严重发“暖”，甚至达到了难以校正的程度，下面的计算结果将进一步说明这个问题。

三 减反膜对摄影镜头的彩色校正作用

众所周知，减反膜具有光谱选择性的减反效果。这种对光谱的选择性决定它对镜头具有一定的彩色校正作用，且不同类型减反膜有不同的校正特性。

单层减反膜（ MgF_2 ）是光学元件通用的减反膜。目前国内各厂家生产的各类摄影镜头大都使用这种涂层。但实践证明，由于 MgF_2 膜的减反效果不高，又有明显的“着色”，因此只能用于注重成象质量或者透镜较少的光学系统（如照相机、定焦距镜头等），而对于同时要求彩色还原性能的高倍率变焦距镜头，就不能单一靠单层膜来解决。

近年来多层宽带反膜的发展，能够使透镜在不改变彩色特性的前提下提高整个可见光谱区的透过，使光学系统获得较好的成象质量，这就为设计和制造出优质的彩色摄影镜头提供了更为有利的条件。然而，这也曾给人们一个错觉，认为采用多层宽带减反膜可以解决镜头的“偏色”问题，因而打算用多层膜代替单层膜。应该指出，宽带减反膜确实具有良好的光谱透射和彩色平衡，如上所述，可以保证基本上不改变彩色特性而提高透镜的透过率。正因

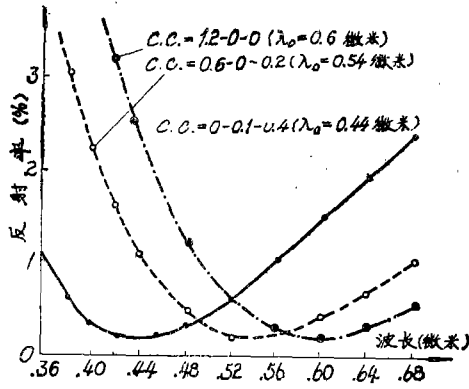


图2 计算的单层MgF₂膜不同中心波长的光谱特性和彩色贡献(c.c.值)。

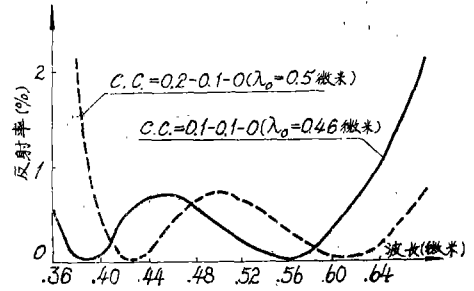


图3 计算的三层减反膜,不同中心波长的光谱特性及其彩色贡献(c.c.值)。

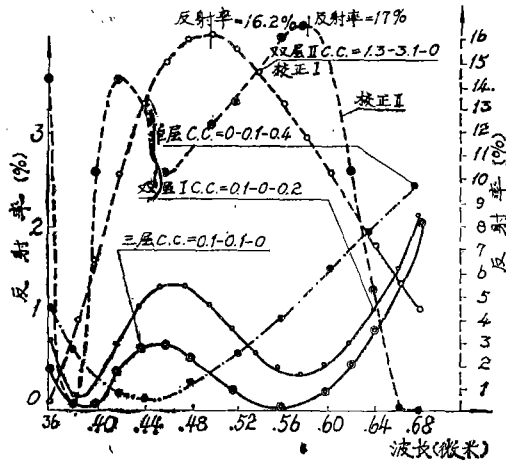


图4 不同类型减反膜计算的光谱特性及彩色贡献(c.c.值)比较

三层膜为 $\frac{\lambda}{4} - \frac{\lambda}{2} - \frac{\lambda}{4}$ 膜, $\lambda_0 = 0.46$ 微米。

由图2、图3可见,不同中心波长的单层减反膜有不同的彩色校正特性,三层膜的校正

为如此,它才无法用来校正已造成失调的摄影镜头的彩色还原。因此,宽带减反膜的这种局限性,加之制备技术和造价上的考虑,对于生产厂家来说必须予以慎重。

图2和图3分别给出用于可见区不同中心波长的单层和三层减反膜计算的光谱特性和C.C.值。

图4给出不同类型减反膜计算的光谱特性和C.C.值。

表1还给出各类减反膜及其同不同基底相匹配后计算的C.C.值变化情况。

表中单层膜为MgF₂膜, $\lambda_0 = 0.44$ 微米;

双层膜I为 $\frac{1}{2}\lambda - \frac{1}{4}\lambda W$ 型膜,
 $\lambda_0 = 0.48$ 微米;

双层膜II为任意厚度彩色校正膜;

表1 不同类型减反膜的c.c.值及其对不同基底彩色特性的校正作用

	基片c.c.值	单层膜c.c.值	双层I c.c.值	双层II c.c.值	三层膜c.c.值
纯膜层		0-0.1-0.4	0.1-0-0.2	1.3-3.1-0	0.1-0.1-0
基片ZBaF ₂	2.3-0.2-0	基片+膜 2.0-0-0.1			基片+膜 2.4-0.3-0
基片ZBaF ₂ +ZF ₀	9.6-0.7-0	基片+膜 8.5-0-0			基片+膜 9.6-0.6-0

作用虽然也与中心波长有关，但其差别不是很大（指在可见区而言，以下皆同）。

由图 4 和表 I 的 C.C. 值数据可见，单层和双层膜比三层膜有较大的彩色校正作用，而三层膜可以基本上不改变基底的彩色特性（即 C.C. 值基本不变）。

四 彩色贡献(C.C.值)的计算方法

根据 Hardy 和 Wurzburg 提出的彩色复现条件和所得出的彩色摄影光谱响应曲线，最后导出摄影镜头光谱透过率的“有效光密度^[2, 3]”：

$$D_{eff} = -\lg T_{eff}$$

$$\text{式中 } T_{eff} = \frac{\int \tau \lambda \cdot P \lambda \cdot S \lambda d\lambda}{\int P \lambda \cdot S \lambda \cdot d(\lambda)} = \frac{\int \tau \lambda \cdot W \lambda d\lambda}{\int W \lambda d\lambda} = \frac{\sum \tau \lambda \cdot W \lambda}{\sum W \lambda}$$

为镜头的有效光谱透过率；

$\tau(\lambda)$ 为镜头无反射时轴上的光谱透过率；

$P(\lambda)$ 为摄影照明光源的光谱能量分布；

$S(\lambda)$ 为标准感光片的光谱灵敏度；

$W(\lambda)$ 为光谱权函数，且 $W(\lambda) = P(\lambda) \cdot S(\lambda)$ 。

因此，当选定了照明光源和摄影软片之后具有不同光谱透过率的摄影镜头就产生不同的彩色

表 2 ZBaF₂ 玻璃彩色贡献 c.c. 值的计算

$\lambda(\mu)$	$\tau(\lambda)$	W_b	$100 \times \tau(\lambda) \times W_b$	W_g	$100 \times \tau(\lambda) \times W_g$	W_r	$100 \times \tau(\lambda) \times W_r$
0.36	0.650	4	260				
0.38	0.854	10	853				
0.40	0.934	18	1681				
0.42	0.970	20	1937.5				
0.44	0.975	20	1949.2				
0.46	0.980	16	1568.8	3	294.1		
0.48	0.984	9	886	5	492.2		
0.50	0.986	3	296	9	887.7		
0.52	0.989			16	1581.3		
0.54	0.991			23	2277.7	1	99.5
0.56	0.993			26	2579.9	3	297.5
0.58	0.993			15	1488.4	6	595.7
0.60	0.995			3	298.3	10	994.6
0.62	0.995					19	1889.1
0.64	0.996					30	2988.6
0.66	0.995					28	2784.9
0.68	0.996					3	298.9
总和 Σ ()			9431.5		9899.6		9949.1
$\times 1/10000$			0.94315		0.98996		0.99491
$-\lg () \times 100$			2.54		0.44		0.22
标准化 C.C. 值			2.32		0.22		0

还原特性，我们就可以根据其透过率计算出摄影镜头的彩色贡献C.C.值。

表II列出对基片为ZBaF₁玻璃C.C.值计算的实例。表中 $\tau(\lambda)$ 为ZBaF₁玻璃已考虑透镜平均厚度吸收的无反射轴上光谱透过率； W_b 、 W_g 、和 W_r 分别为光谱权函数的蓝、绿、红三路的特定值；计算中对光谱权函数作归一化处理，即 $\sum W_{b,i}(\lambda) = \sum W_{g,i}(\lambda) = \sum W_{r,i}(\lambda) = 100$ ；C.C.值标准化是用求得C.C.值三个数字中最小的一个分别去减三个数。

由表II计算出ZBaF₁玻璃的C.C.值为2.32—0.22—0可见，测出玻璃基片纯吸收的光谱透过率，就可按表中程序计算出它的C.C.值。同样，透镜镀膜后的C.C.值也是由透镜镀膜后的光谱透过率计算。

经数值计算表明，透镜玻璃、减反膜和涂镀减反膜后透镜的C.C.值有如下近似关系：

单透镜：

$$C.C._{\text{镀膜后}} \cong C.C._{\text{玻璃}} + C.C._{\text{膜}} \quad (1)$$

多镜片系统（镜头）：

$$C.C._{\text{镀膜后}} \cong C.C._{\text{玻璃总体}} + C.C._{\text{膜系总体}} \quad (2)$$

式中 $C.C._{\text{玻璃总体}}$ 由 $\prod(T_{i,\text{玻璃}})$ 计算出的透过率计算所得；

$C.C._{\text{膜系总体}}$ 由 $\prod(T_{i,\text{膜}})$ 计算出的透过率计算所得。

如果要求透镜或镜头涂镀减反膜后获得理想的彩色还原，即C.C. = 8—0—0，那么减反膜的彩色贡献应为：

$$C.C._{\text{膜}} = C.C._{\text{标准}} - C.C._{\text{玻璃(或镜头)}} \quad (3)$$

根据公式（3）给出的C.C.值选择减反膜，即为完善的彩色校正膜，可实现对玻璃透镜或镜头的彩色还原。

五、用于10倍变焦距彩色摄影镜头减反膜系的设计思想和计算结果

1. 设计思想

图1中曲线c为镜头标准光谱透过率，其C.C.值为8—0.4—0。比较曲线a、b、c可见，镜头彩色失调的主要原因是蓝光区吸收过大，其中国产玻璃镜头尤为严重。因此要使镜头彩色还原好，就必须设法提高蓝光部分的光透过；另一方面作为实际使用的需要，还应考虑到镜头的透镜多，光路长，光的损失也大，还必须尽量提高整个可见光谱区的光透过，以提高成象质量。所以，决定镜头涂镀减反膜的选择原则应是采用单、双层膜进行彩色校正，在不破坏彩色的前提下尽量施加多层宽带减反膜。

2. 设计方法

用于摄影镜头减反膜系的设计方法有两个：

〈1〉根据测得摄影头无反射的光谱透过，计算出所需减反膜系总的彩色贡献C.C.值，通过膜系自动设计程序设计出一个满足镜头彩色还原、各玻璃—空气界面以涂镀单层或多层减反膜为主，另有一个或二个界面涂有适宜的彩色校正膜（如非规整双层膜^[5]或多层膜）的膜系。

这种方法的关键在于使用膜系自动设计程序设计出具有给定特性曲线的彩色校正膜，而且设计时还必须充分考虑校正膜系制备工艺的可靠和实用。如图1曲线b所示的肖特玻璃镜头，可施加一个类似曲线d光谱透过的校正膜进行校正。

〈2〉在不使用自动设计程序的情况下,可采取试探算法,根据镜头总的无反射光谱透过率,和现有的单、双、多层膜系,选择适当减反膜同镜头诸界面匹配,再用电子计算机计算出总的光谱透过率和C.C.值(或总膜系的C.C.值),然后同标准C.C.值(或总膜层应增加的C.C.值)相比较,如果不满足要求,再相应修正某一个或几个膜系,再计算、再比较,直到达到或接近彩色还原为止。这种方法虽然繁琐些,但比较直观,又不需要自动设计,因此有一定的灵活性和实用性。

3. 设计结果

我们基于上述试探算法,并结合施加校正膜进行减反膜系的设计。设计中,依据国产玻璃镜头所用10种玻璃,选择四类减反膜和二种彩色校正膜、共十几个不同中心波长的膜系进行匹配计算。为了比较说明,同样对肖特玻璃镜头也相应做了匹配计算。其计算结果列入

表3 国产玻璃和肖特玻璃镜头施加不同减反膜系的计算光谱透过率和C.C.值

减反膜系方案	减反膜系结构特点	平均透过率 (0.44—0.64)	C.C.值
国产玻璃镜头	1 校正膜 I + 不同入.单层膜	47%	11.3—0—0.8
	2 校正膜 I + 7个多层,其余单层膜	53%	12.6—0—0.7
	3 校正膜 I + 7个多层,其余单层膜	58%	18.0—0—1.2
肖特玻璃镜头	4 校正膜 I + 不同入.单层膜	67%	11.8—0—1.1
	5 双层+校正膜 I + 4个多层,其余单层膜	71%	9.95—0—0.7
	6 双层+校正膜 I + 6个多层,其余单层膜	73%	10.2—0—0.30
	7 校正膜 II + 多层膜	76%	9.94—0.24—0

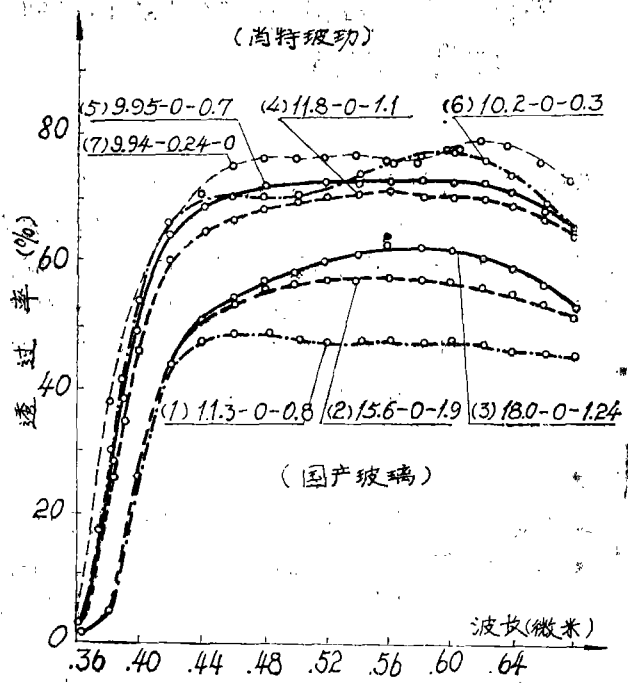


图5 国产玻璃和肖特玻璃镜头施加不同方案减反膜系后计算的光谱透过率和c.c.值。

表 3, 光谱透过曲线绘于图 5。

表中校正膜 I、II 均为按曲线要求初步设计的非规整膜系, 其中校正膜 I、II 绘入图 4 的双层 I 和校正 II。

由表 3 和图 5 的计算结果不难看出, 摄影镜头施加适宜的减反膜和彩色校正膜之后, 可以明显改善其彩色还原特性, 通过施加多层减反膜可有助于镜头透过率的提高, 按曲线要求设计特定校正膜可以使镜头的透过率和彩色还原特性同时获得提高和改善。如方案 (6) 和 (7)。

但是还应指出, 上述计算中由于未能使用自动设计程序设计出理想的减反膜系和校正膜, 而是用试探法逐步逼近求得, 因此表 III 的各方案数据尚不是最佳结果, 如 C.C. 值还可以进一步逼近理想值。

表 4 给出一组肖特玻璃镜头按表 III 中方案 5 对诸界面匹配减反膜系计算的彩色贡献 C.C. 值。表中 C.C._{玻璃}、C.C._{膜系} 和 C.C._{镜头} 皆由各自的总透过率计算所得。若按近似公式 (2) 则 $C.C._{镜头} = C.C._{玻璃} + C.C._{膜系} = 10.11 - 0 - 0.65$, 此结果同表 IV 计算结果非常接近, 由此进一步表明了近似公式的适用性。

表 4 肖特玻璃的 10 倍变焦距镜头施加减反膜前后的彩色还原 (方案 5)

序号	玻璃牌号	折射率	镀膜面	选用膜系	减反膜的 C.C. 值
1	ZF ₆	1.76	双	单层	0—0.7—1.56
2	ZK ₉	1.62	双	单层	0.25—0—0.32
3	K ₂	1.50	双	非均匀多层	0—0.06—0.03
4	LaK ₃	1.74	双	单层	0.48—0—0.52
5	QK ₁	1.47	单	三层	0—0—0.15
6	ZF ₇	1.81	单	单层	合 0.54—0—0.64
7	ZK ₉	1.62	双	单层	0.25—0—0.32
8	ZF ₇	1.81	单	单层	
9	ZB ₂ F ₁	1.62	单	三层	0.11—0—0.3
10	LaK ₃	1.74	双	单层	0—0.89—1.79
11	LaK ₃	1.74	单	单层	0—0.44—0.9
12	ZF ₃	1.72	双	单层	0—0.85—1.65
13	LaK ₃	1.74	双	单层	0—0.89—1.79
14	BaK ₇	1.56	双	非均匀多层	0.36—0.4—0
15	ZF ₇	1.81	单	双层 II	1.32—3.07—0
16	K ₂	1.50	单	非均匀多层	0—0.03—0.02

C.C._{玻璃} = 12.0—0.4—0, C.C._膜 = 0—1.49—2.54

校正后 C.C._{镜头} = 9.95—0—0.7

六、初步结论

1. 变焦距摄影镜头的减反膜一般不能按通常以增加光透过为目的的思想考虑, 还必须同时着眼于彩色还原标准, 合理地选择减反膜系相匹配。

2. 减反膜具有一定的彩色校正作用, 其中单、双层减反膜有明显的选择性光谱透过,

可用来改善摄影镜头的彩色失调；多层减反膜具有平坦型的光谱透过，其彩色贡献较小，但透过率高，有助于镜头的成像质量。大幅度的彩色校正应由适宜的彩色校正膜实现。因此，镜头的彩色还原应采用单、双层和多层宽带减反膜同彩色校正膜相结合的方法，使镜头的成像质量和彩色还原同时获得提高。

3. 单镜片和多镜片系统的彩色贡献可按公式(1)和(2)近似计算。对于多镜片系统，其减反膜总的彩色贡献不能按诸界面减反膜的彩色贡献相加的方法计算，应由诸膜系相乘的总透过率计算求得。由表4实例的数据，若诸减反膜总的彩色贡献按诸膜的C.C.值相加，则有：

$$C.C._{\text{膜系}} = \sum_{i=1}^{16} C.C._i = 0 - 4.12 - 6.68$$

可见其值同表4计算所得 $C.C._{\text{膜系}} = 0 - 1.49 - 2.54$ 相差甚大。同理，对诸玻璃总的彩色贡献也必须这样处理。

4. 使用目前国产玻璃制作10倍变焦距摄影镜头，还必须对玻璃材质进行严格筛选（主要是短波透过率要高），否则难以通过减反膜和校正膜实现理想的彩色还原，除非象表Ⅲ中方案(1)对其透过率作较大的损失。

这项工作得到蒋筑英同志的热心帮助，不仅提供了测试的有关数据，还为定稿做了审改；计算中心机房的同志为计算工作提供了许多方便；张德强同志协助做了不少计算工作。对此，作者一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 宋世春译；光学机械，1977，No. 5，53.
- [2] 蒋筑英；1981年中国光学学会颜色光学首次学术交流会报告.
- [3] 郑骅铃；电影光学，1979，No. 3，9.
- [4] A.E.Murray；J.O.S.A.，1956，46，No. 10，790.
- [5] J.A.Dobrowolski；Appl.Opt.，1979，18，No. 12，1879.