

## 第二章 消色差雙合透鏡(The Achromatic Doublet)

考慮二個具有實際和遠離的物體，聯合等效焦距為  $F$  的薄透鏡。令  $F_a$  為  $a$  透鏡（朝向長共軛）的焦距長，具有  $V$  值為  $V_a$ ，以及令  $F_b$  為  $b$  透鏡的相似定義，然後（Kingslake, 1978, P.80）我們得到：

$$F_a = \frac{(V_a - V_b)F}{V_a} \quad \text{以及} \quad F_b = \frac{(V_b - V_a)F}{V_b}$$

使用薄透鏡  $G$  總和公式（Smith, 1966, P.281; Ingalls, 1953, P.208）來得到一個無三階球差與慧差的透鏡系統，對於薄透鏡，消色差的偶合鏡組我們可以得到如下的演算法。

選擇材質， $V_a, N_a, V_b, N_b$ ；以及系統焦距長  $F$ ，由上述方程式計算  $F_a$  與  $F_b$

$$C_a = \frac{1}{F_a(N_a - 1)}, \quad C_b = \frac{1}{F_b(N_b - 1)}$$

$$H = (G8b)(C_b)^2 - (G8a)C_a^2 - (G7b)C_b / F$$

$$I = (G5a)C_a / 4 \quad K = (G5b)C_b / 4$$

$$A = (G1a)C_a^3 + (G1b)C_b^3 - (G3b)C_b^2 / F + (G6b)C_b / F^2$$

$$B = -(G2a)C_a^2, \quad E = (G4a)C_a, \quad J = (64b)C_b$$

$$D = (G2b)C_b^2 - (G5b)C_b / F, \quad P = A + H(JH / K - D) / K$$

$$Q = B + I(2JH / K - D) / K, \quad R = E + J(I / K)^2$$

$$\text{根} = Q^2 - 4PR \quad (\text{檢查負根})$$

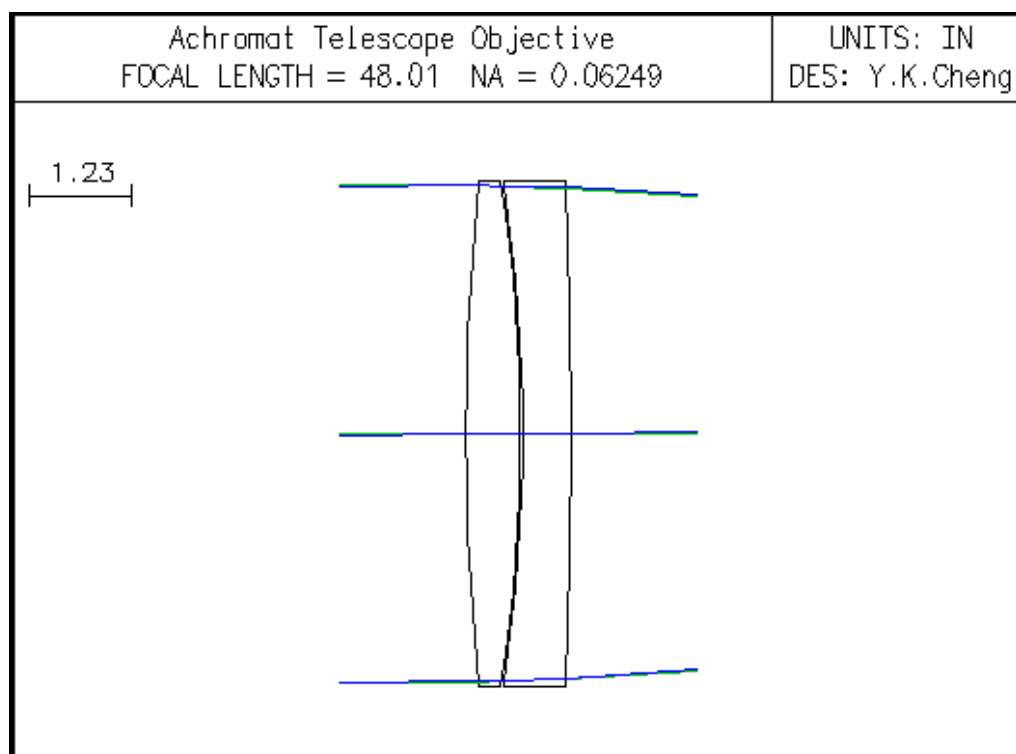
$$C_1 = \frac{-Q + \sqrt{\text{根}}}{2R} \quad (\text{King, 1993})$$

$$C_4 = -(H + IC_1) / K, \quad C_2 = C_1 - C_a, \quad C_3 = C_b + C_4$$

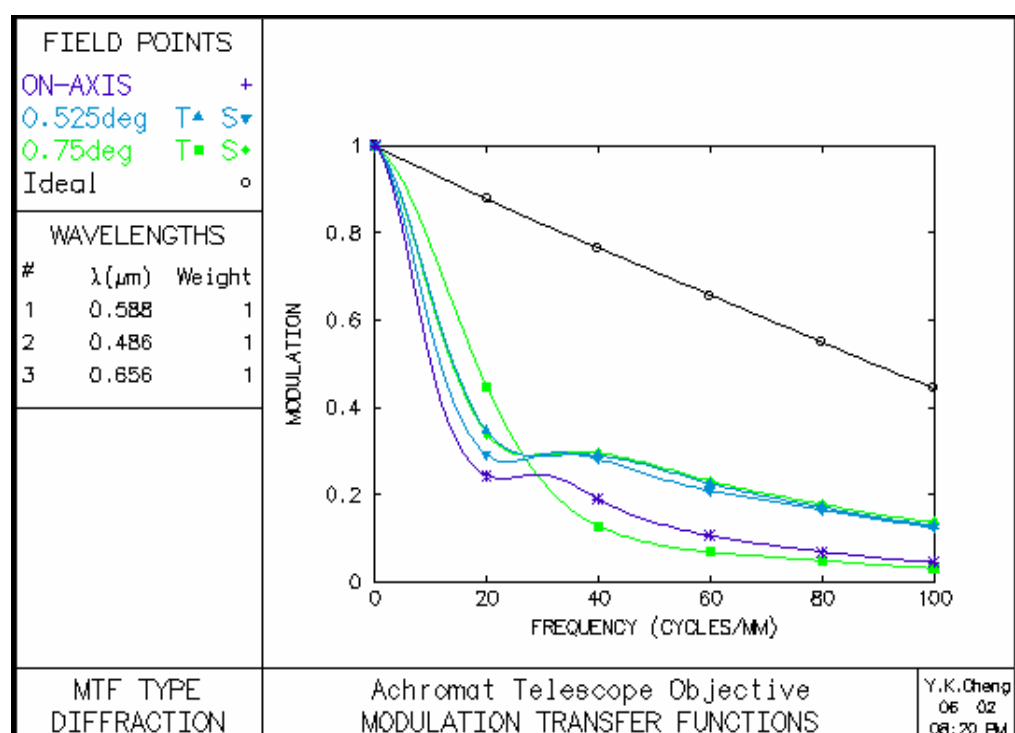
在上面的方程式中， $G1a$  是  $a$  透鏡的  $G1$  總和， $G8b$  是  $b$  透鏡的  $G8$  總和，以此類推。[見 Smith (1966)]。也就是說， $G8 = N(N-1)/2$  等等。 $C_1, C_2, C_3$ ，和  $C_4$  為表面曲率。

我曾經將這個演算法程式化在我的電腦中，以快速得到薄透鏡，三階的解作為透鏡最佳化的開始。

現在給定幾個焦距長為 10 的例子。第一個案例是，波長範圍 8~14mm，然後隨之而來三個可見光範圍的組合：BK-7 與 SF-2 玻璃，Bak-4 與 F-3，BAK-1 與 SF-8。接下來的是使用  $CaF_2$  與石英的 UV 雙重透鏡。最後二個例子是適用紅外波段，3.2-4.2  $\mu m$ ：一個矽-鍺化合物，隨後為一個 IRTRAN2-IRTRAN1 雙重透鏡。



(a)



(b)

圖 2-1 (a)焦距 48 消色差望遠物鏡 (b) 系統 MTF

第二個案例按照焦距長 48 的比例，用來作為視場  $1.5^\circ$  的  $f/8$  望遠鏡。它已被最佳化且表示在圖 2-1。這個鏡組的資料如表 2-1。

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS
OBJ	0.000000	1.0000e+20	1.3091e+18	AIR
AST	29.209700	0.655000	3.050000 A	BK7 C
2	-19.904700	0.032000	3.050000	AIR
3	-19.897900	0.578000	3.000000	SF2 C
4	-66.393700	47.381000	3.050000	AIR
IMS	0.000000	0.000000	0.628636 S	

表 2-1 焦距 48 消色差望遠物鏡

第一個透鏡的表面到影像的距離是 48.646。

圖 2-2 表示一個膠合消色差透鏡， $f/6$ ，焦距長 20 英吋。視場為  $15^\circ$ 。這個鏡組的資料：

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS
OBJ	0.000000	1.0000e+20	1.3091e+18	AIR
AST	12.801800	0.434000	1.705000 A	BAK1 C
2	-9.062300	0.321000	1.705000	SF8 C
3	-37.655300	19.631000	1.705000	AIR
IMS	0.000000	0.000000	0.262195 S	

表 2-2 膠合消色差透鏡組

第一個透鏡的表面到影像的距離是 20.386。

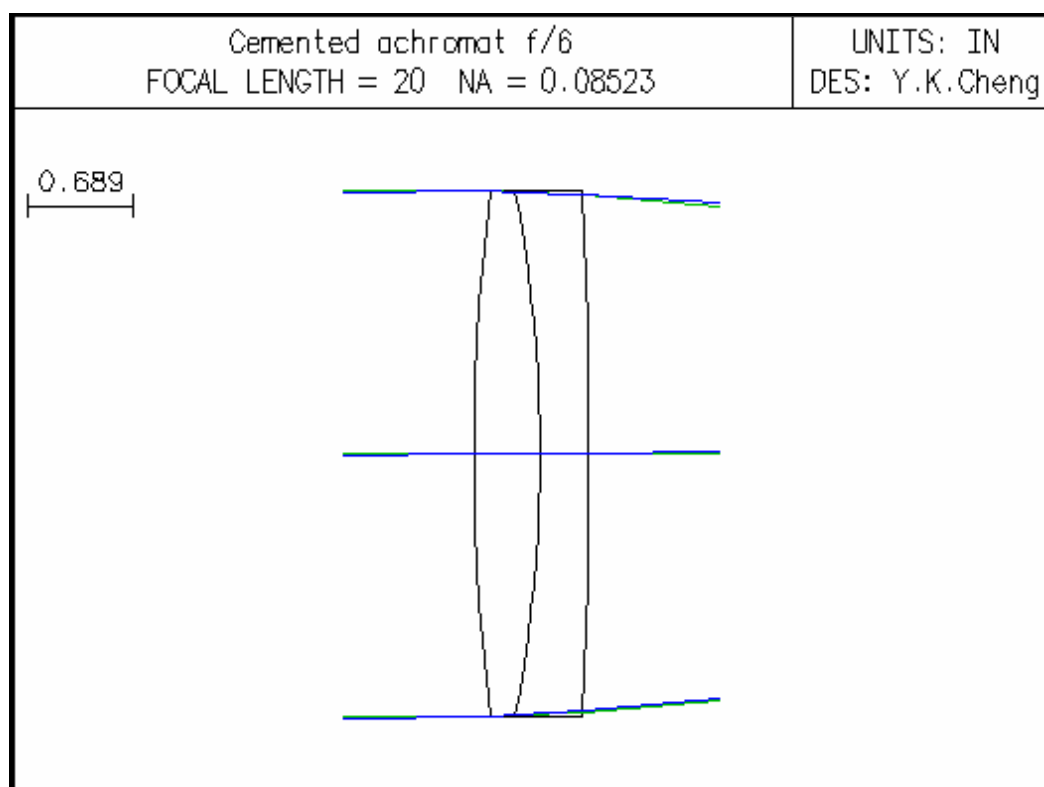
在這二個設計中，入射瞳孔與第一個透鏡表面接觸。跟這類設計的典型一樣，離軸經緯面(sagittal)的 MTF 比子午面(tangential)的好。因為小的視場與大的焦數，這裡的主要像差為第二色差和場曲。縱向第二色差約相等於焦距長的二千分之一。

Petzval 表面的半徑， $R_p$ （對於單一薄透鏡）等於  $Nf$ 。然而在上述的雙合例子， $R_p=1.45F$ 。由於像散的存在，最佳像面實際上比這短，大約是 0.48 焦距長。

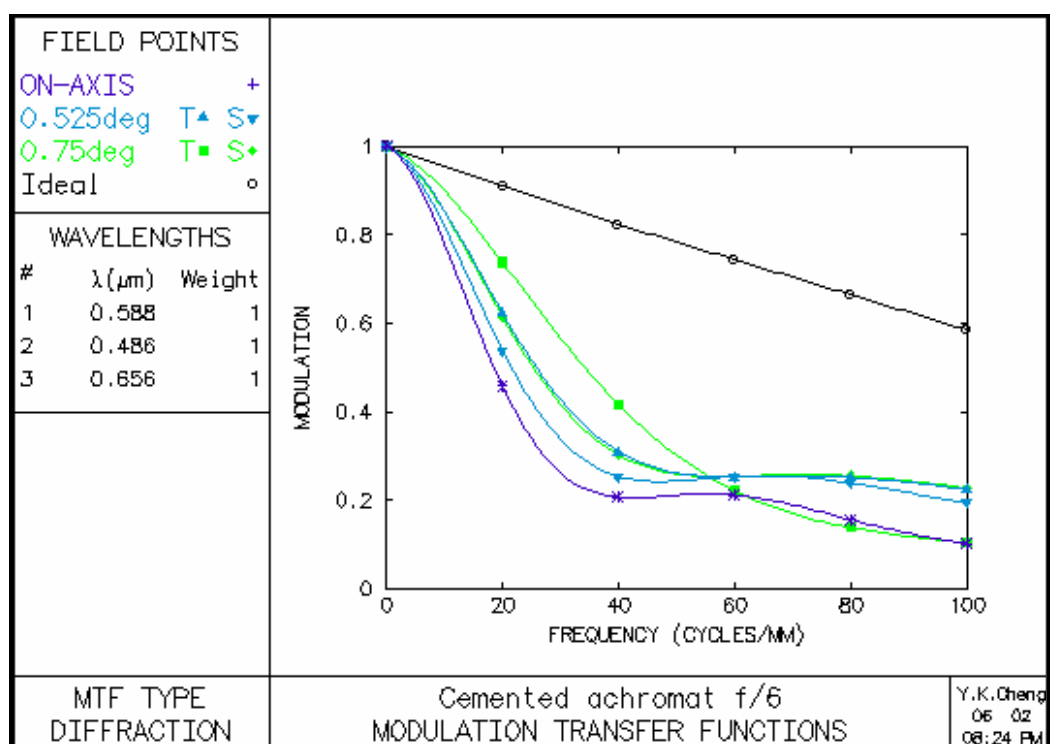
這些相同的方程式可用來求得負焦距長的透鏡，所謂的 Barlow 透鏡(Ingalls, 1953)對於一個焦距 -10 的消色差透鏡，只要簡單地改變表 2-1 中曲率的符號。

如同之前所討論的，為了減低第二色差。必須選定遠離玻璃線的材質。對於三個相接觸薄透鏡， $\sum f_i P_i / V_i$  必須為零，其中  $f_i$  為透鏡元件的放大率。在這裡 (Knetsch, 1970)，

$$V_i = \frac{N_e - 1}{N_f - N_c} \quad \text{以及} \quad P_i = \frac{N_f - N_e}{N_f - N_c}$$

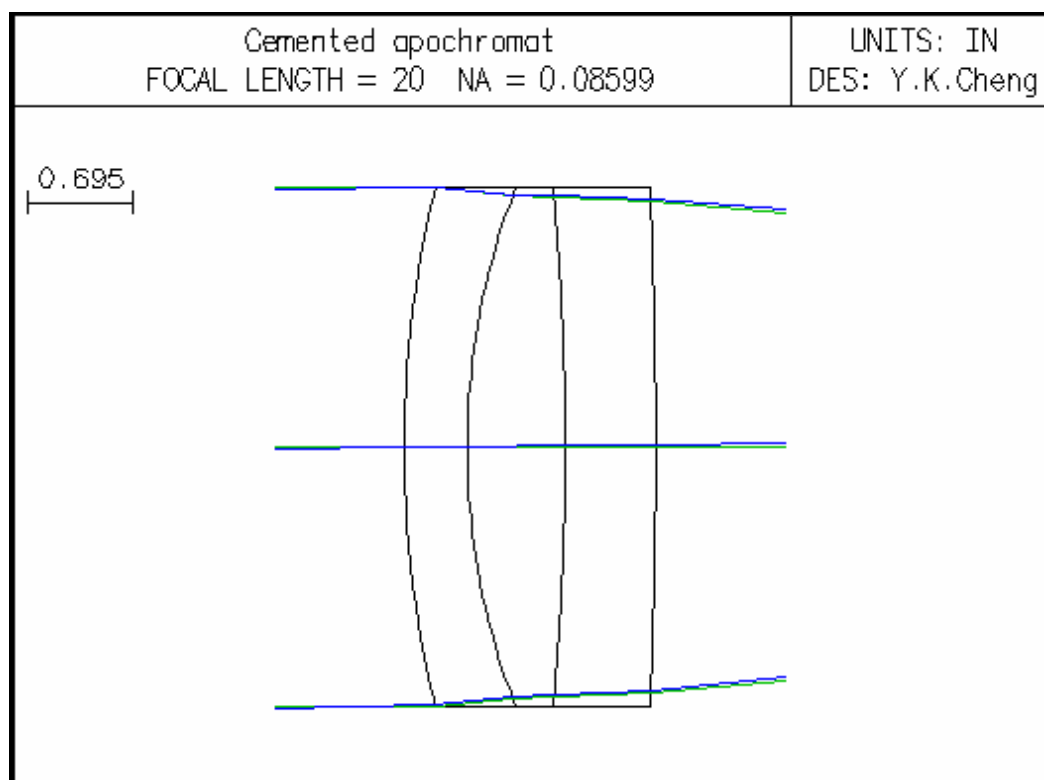


(a)

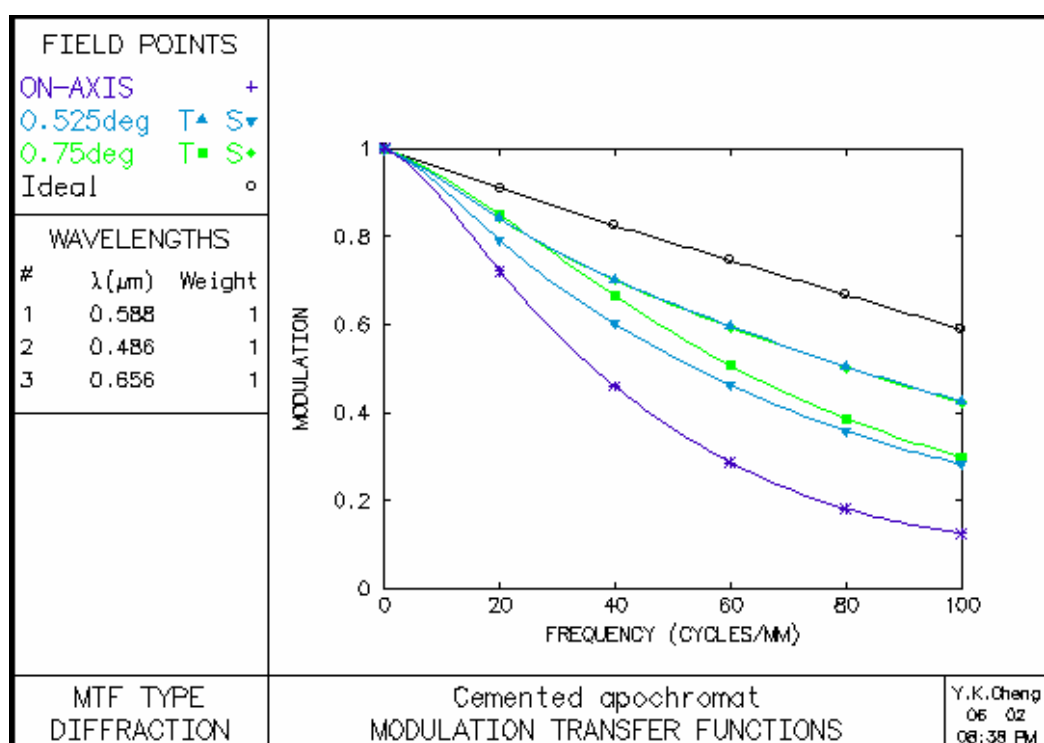


(b)

圖 2-2 (a) 膠合消色差透鏡組 (b) 系統 MTF



(a)



(b)

圖 2-3 (a)膠合複消色差透鏡組 (b) 系統 MTF

表 2-3 的資料是一個膠合三元件透鏡，可以大量地減少第一色差。

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS
OBJ	0.000000	1.0000e+20	1.3091e+18	AIR
AST	7.332400	0.417000	1.720000 A	SSKN5 C
2	4.792900	0.655000	1.720000	O_S-FPL53 C
3	-18.222500	0.600000	1.720000	BAK1 C
4	-44.880000	18.846000	1.720000	AIR
IMS	0.000000	0.000000	0.262178 S	

表 2-3 膠合複消色差透鏡組

第一個鏡面到影像的距離是 20.519。入射瞳孔與第一鏡面相接觸。就像圖 2-2 的消色差透鏡，它是  $f/6$ ，焦距長 20 吋並具有視場  $1.5^\circ$ 。它被表示在圖 2-3a 以及 MTF 在圖 2-3b。縱向第二色差為焦距/7400。這樣大幅改差近軸 MTF。然而離軸 MTF 被像散限制了，如同上面的消色差透鏡一般。

## 參考文獻

- Hastings, C. S. ( 1889 ) . Telescope objective, U.S. Patent 415040.
- Hopkins, R. E. ( 1955 ) . Automatic design of telescope objectives, JOSA, 45:992.
- Ingalls, A. G( Ed. )( 1953 ) Amateur Telescope Making, Book 3, Scientific American, New York.
- King, S.( 1993 ) . Personal correspondence. I would like to thank him for pointing out a subtle error in the previous edition.
- Kingslake, R. ( 1978 ) . Lens Design Fundamentals, Academic, New York.
- Knetsch, G. ( 1970 ) .Three lens objective with good correction of the secondary spectrum, U.S. Patent 3536379.
- Kutsenko, N. I.( 1975 ) . The calculation of thin three lens cemented components, Sov. J. Opt. Tech., 45:82.
- Lessing, N. W. ( 1957 ) . Selection of optical glasses in apochromats, JOSA, 47:955.
- Reidl, M. ( 1981 ) . The thin achromat, Electro-Opt. Syst. Design, Sept. 1981:49.
- Smith, W. ( 1966 ) . Modern Optical Engineering, McGraw-Hill New York.
- Uberhagen, F. ( 1970 ) . Doublet which is partially corrected spherically, U.S. Patent 3511558.