

不同初始結構計算方法獲得之匹茲凡物鏡設計結果比較

蘇致遠¹楊博華²

¹嘉南藥理科技大學資訊管理系, 台南縣仁德鄉二仁路一段 60 號

TEL: 886-6-2664911 ext 360, E-mail: zysu@mail.chna.edu.tw

²國家高速網路與計算中心, 台南縣新市鄉南科三路 28 號

TEL: 886-6-5050940 ext 735, E-mail: n00phy00@nchc.org.tw

摘要--- 確定光學系統的初始結構參數經常為光學設計的起點, 它可以由兩種不同的方法出發, 即根據初級像差理論用代數法求解初始結構與從已有的專利文獻資料中選擇初始結構。本研究將以文獻[1]為基礎, 輔以光學軟體, 比較不同初始結構計算方法獲得之匹茲凡物鏡設計結果。

關鍵字: 鏡頭設計、匹茲凡物鏡

像差方程式

初級像差係數與結構參數之間的像差方程式分為兩組：

- 1.和外部參數有關的像差方程式：a.光焦度分配 $\phi = \sum h\phi$ b.校正位置色差 $C_I = h^2\phi \sum C_I$ c.校正倍率色差 $C_{II} = hh_2\phi \sum C_{II}$ d.校正匹茲凡場曲 $S_{IV} = J^2 \sum \mu\phi$ 。
- 2.和內部參數有關的像差方程式：a.校正球差 $S_I = \sum h^4\phi^3 P$ b.校正慧差 $S_{II} = \sum h^3h_2\phi^3 P + J \sum h^2\phi^2 W$ c.校正像散 $S_{III} = \sum h^2h_2^2\phi^3 P + 2J \sum hh_2\phi^2 W + J^2 \sum \phi$ d.校正畸變 $S_V = \sum hh_2^3\phi^3 P + 3J \sum h_2^2\phi^2 W + J^2 \sum \frac{h_2}{h} \phi(3 + \mu)$ 。式中 h 和 h_2 是第一近軸光線與第二近軸光線(主光線)在各光組上的高度, ϕ 是各光組的光焦度, J 是系統拉赫不變量。

$$P_i = \sum_{i=1}^k \left(\frac{\Delta u_i}{\Delta(1/n_i)} \right)^2 \Delta \left(\frac{u_i}{n_i} \right) \quad W_i = - \sum_{i=1}^k \left(\frac{\Delta u_i}{\Delta(1/n_i)} \right) \Delta \left(\frac{u_i}{n_i} \right) \quad \mu_i = \sum_{i=1}^k \frac{1}{n_i} \quad \Delta u_i = u'_i - u_i \quad \Delta \frac{1}{n_i} = \frac{1}{n'_i} - \frac{1}{n_i} \quad \Delta \frac{u_i}{n_i} = \frac{u'_i}{n'_i} - \frac{u_i}{n_i}$$

像差校正

在分離雙光組物鏡中, 最典型的物鏡是具有大孔徑小視場的匹茲凡型物鏡。在求解初始結構時, 假定系統是由薄透鏡光組組成的。取規一化條件, $f' = 1, h_1 = 1, u_1 = 0, u'_k = 1, u_{-j} = -1, J = 1$ 。用 ϕ_1 和 ϕ_{II} 表示第一光組和第二光組的光焦度, 則系統的總光焦度為 $\phi = h_1\phi_1 + h_{II}\phi_{II} = 1$, 設 d 為兩光組之間的間隔, 由近軸公式則為 $h_{II} = h_1 - du_{II} = 1 - \phi_1 d$, 由上式得 $\phi_1 = u_{II}, \phi_{II} = (1 - u_{II})/h_{II}, d = (1 - h_{II})/u_{II}$, 由此式可以算出系統的外部參數 $u_{II}, h_{II}, d, \phi_1$ 和 ϕ_{II} 。

由於系統是由兩個正光組組成的, 並且具有較大的間隔, 所以不能校正匹茲凡場曲, 一般 $S_{IV} = 0.8 \sim 1.2$ 。為使物鏡具有良好的成像品質, 物鏡的視場角不能大於 $15^\circ \sim 20^\circ$ 。在像差校正中, 必須校正好球差、慧差、和兩種色差。由於 S_{IV} 不能校正, 必須用像散來補償匹茲凡場曲, 所以像散應該取負值。假定入瞳與第一光組重合, 這時第二近軸光線(主光線)的參數為 $h_{-j} = 0, u_{-j} = u_{III} = -1, h_{-II} = -d$ 。將其代入式 $\phi = \sum h\phi, C_I = h^2\phi \sum C_I, C_{II} = hh_2\phi \sum C_{II}, S_{IV} = J^2 \sum \mu\phi$ 中, 則有 $\phi_1 C_{II} + h_{II}^2 \phi_{II} C_{II} = 0, h_{-II} h_1 \phi_{II} C_{II} = 0$ 。

從上段最後兩式可得知, 只有每個光組單獨校正色差、兩種色差才能同時校正。這就要求每個光組必須選用雙膠合物鏡。系統外部參數計算完之後, 可按式 $S_I = \sum h^4\phi^3 P, S_{II} = \sum h^3h_2\phi^3 P + J \sum h^2\phi^2 W,$

$S_{III} = \sum h^2h_2^2\phi^3 P + 2J \sum hh_2\phi^2 W + J^2 \sum \phi$ 確定校正單色像差的方程式。

為了解上述三個方程式, 需將 h, h_2, ϕ, J 代入式中, 則得到含有 P_i, W_i, P_{II}, W_{II} 四個未知數的方程組。在解方程組時, 右邊的自由項可按下面的經驗數據選取。 $S_I = 0.2 \sim 0.3$ 以補償大相對孔徑產生的高級球差; $S_{II} = 0, S_{III} = -(0.05 \sim 0.15)$ 以補償較大的匹茲凡場曲。

方程式 $S_I = \sum h^4\phi^3 P, S_{II} = \sum h^3h_2\phi^3 P + J \sum h^2\phi^2 W, S_{III} = \sum h^2h_2^2\phi^3 P + 2J \sum hh_2\phi^2 W + J^2 \sum \phi$ 中有四個未知數三個方程式, 無法求解, 為此需要附加一個球差最小條件。因為 h_1 比 h_{II} 約大 3 倍, 所以高級像差主要產生在第一光組上。故第一光組的基本像差參量 P_i, W_i 應使第一光組具有最小高級球差。這時 P_i 是正的, W_i 趨近零。

經驗表明, $u_{II} = 0.5 \sim 0.7, h_{II} = 0.3 \sim 0.5$ 將能得到合理的解。選擇好 u_{II}, h_{II} 之後, 按式

$\varphi_I = u_{II}, \varphi_{II} = (1 - u_{II})/h_{II}, d = (1 - h_{II})/u_{II}$ 可求出 φ_I, φ_{II} 和 d 。為解方程式 $S_I = \sum h^4 \varphi^3 P$, $S_{II} = \sum h^3 h_z \varphi^3 P + J \sum h^2 \varphi^2 W$, $S_{III} = \sum h^2 h_z^2 \varphi^3 P + 2J \sum h h_z \varphi^2 W + J^2 \sum \varphi$, 應將其中的基本像差參量 P_I, W_I, P_{II}, W_{II} 變換成 $P_I^\infty, W_I^\infty, P_{II}^\infty, W_{II}^\infty$ 。從高級球差最小條件出發, 取 $W_I^\infty = 0$ 。這時將得到具有三個未知數 $P_I^\infty, P_{II}^\infty, W_{II}^\infty$ 的三個方程式, 解此方程組, 就可求出 $P_I^\infty, P_{II}^\infty, W_{II}^\infty$ 。然後由式 $\varphi_I C_{I1} + h_{II}^2 \varphi_{II} C_{I2} = 0, h_{zII} h_I \varphi_{II} C_{II} = 0$ 求出 C_{I1} 和 C_{I2} 。再根據 P^∞, W^∞ , 求出 P^0 , 根據 P_{01}, C_{I1} 和 P_{02}, C_{I2} , 從光學設計手冊中的 PW 表中選取兩個光組的玻璃組合, 計算各光組的曲率半徑, 再將規一化半徑乘以實際焦距, 就得出各光組的實際曲率半徑。選擇好透鏡厚度再將其轉換到厚透鏡系統, 就得到一個完整的初始結構。

計算實例

設計一個焦距 $f' = 150\text{mm}$, 相對孔徑 $D/f' = 1/2$, 底片尺寸為 $22\text{mm} \times 16\text{mm}$ 的物鏡。進行步驟如下:

1. 選擇物鏡結構

首先計算物鏡的視場角, 由底片尺寸為得 $\omega = 5.2^\circ$ 。由於視場角小所以應選擇匹茲凡型物鏡。

2. 計算系統的外部參數

為解方程式(1)取 $u_{II} = 0.71, h_{II} = 0.342\text{mm}$, 得 $\varphi_I = 0.71; \varphi_{II} = (1 - \varphi_I)/h_{II} = 0.848$ $d = (1 - h_{II})/u_{II} = 0.9268\text{mm}$ 假定入瞳與第一光組重合, 則 $h_{zI} = 0$ 。由此得 $h_{zII} = h_{zI} - d u_{zI} = d = 0.9268\text{mm}$ 。

3. 解像差方程組

$S_I = \varphi_I^8 P_I^\infty + h_{II}^4 \varphi_{II}^8 P_{II}^\infty, S_{II} = \varphi_I^2 W_I^\infty + h_{II}^8 h_{zII} \varphi_{II}^8 P_{II}^\infty + h_{II}^2 W_{II}^\infty, S_{III} = h_{II}^2 h_{zII}^2 P_{II}^\infty + 2h_{II} h_{zII} \varphi_{II}^2 W_{II}^\infty + \varphi_I + \varphi_{II}$ 。將 $\varphi_I, \varphi_{II}, h_{II}, h_{zII}$ 代入上式化簡並將 P_{II}, W_{II} 化成 $P_{II}^\infty, W_{II}^\infty$, 為此將進行規一化 $u_{II} = u_{II}/(h_{II} \varphi_{II}) = 2.45$ 。

$W_{II} = W_{II}^\infty - u_{II}(2 + \mu), P_{II} = P_{II}^\infty - u_{II}(4W_{II}^\infty + 1) + u_{II}^2(3 + 2\mu)$ 代入上式, 並取 $S_I = 0.24, S_{II} = 0, S_{III} = -0.1$, 化簡得 $0.358P_I^\infty + 0.00834P_{II}^\infty - 0.0817W_{II}^\infty = 0.045, 0.0226P_{II}^\infty - 0.136W_{II}^\infty + 0.5401W_I^\infty = 0.18, 0.0613P_{II}^\infty - 0.144W_{II}^\infty = -0.1294$ 上邊三個方程式有四個未知數, 無法求解。為此附加一個球差最小的條件。讓第一光組具有最小球差。因此取 $W_I^\infty = 0.2$, 將其代入上式解之得 $P_I^\infty = 0.193, W_I^\infty = 0.2, P_{II}^\infty = -1.1, W_{II}^\infty = 0.426$ 。

4. 計算初始結構參數

(1) 第一光組的結構參數

選用冕牌玻璃在前的雙膠合物鏡做為第一光組的結構。為計算其結構參數, 必須先計算 P_0 , 再按 P_0 和 C_I 選擇玻璃組合, 計算結構參數。

$P_0 = P_I^\infty - 0.85(W_I^\infty + 0.1)^2 = 0.116$ 取 $C_{I1} = 0.002$, 再按 $P_{01} = 0.116$ 查光學設計手冊得 K9: $n_D = 1.5163, \nu = 64.1$; F5: $n_D = 1.6242, \nu = 35.9$ $\varphi_I = 2.1098, A = 2.4163, K = 1.7081, Q_0 = -4.5687, P_0 = 0.09763, W_0 = -0.0763$ 。因為 $Q = Q_0 \pm \sqrt{(P_I^\infty - P_0)/A}$, 所以 $Q = -4.39$ 和 $Q = -4.79$ 。取 $Q = -4.39$ (Q 的絕對值小, 曲率半徑大, 高級像差小), 則曲率 ρ_1, ρ_2 和 ρ_3 為

$$\rho_2 = \varphi_I + Q = -2.2802, \rho_1 = \varphi_I/(n_1 - 1) + \rho_2 = 1.8062, \rho_3 = \rho_2 - (1 - \varphi_I)/(n_2 - 1) = -0.5022,$$

$$f'_1 = f'/\varphi_I = 211.2678\text{mm} \quad r_1 = f'_1/\rho_1 = 116.968\text{mm}, \quad r_2 = f'_1/\rho_2 = -92.653\text{mm}, \quad r_3 = f'_1/\rho_3 = -420.685\text{mm}$$

(2) 第二光組的結構參數

選用冕牌玻璃在前的雙膠合物鏡做第二光組的結構, 用前面相同的方法計算得 $P_{02} = 1.35$, 取

$C_{I2} = 0.001$ 查光學設計手冊得 K10: $n_D = 1.5181, \nu = 58.9$; ZF1:

$$n_D = 1.6475, \nu = 35.9 \quad \varphi_I = 2.7061, A = 2.4495, K = 1.72471, Q_0 = -5.1043, P_0 = -1.15, W_0 = -0.4295$$

計算得

$$Q = -4.9765, \rho_1 = 1.6928, \rho_2 = -2.7, \rho_3 = -0.7296, f'_2 = 176.887\text{mm}, r_1 = 104.494\text{mm}, r_2 = -65.514\text{mm},$$

$$r_3 = -242.44\text{mm}。兩個光組之間間隔 $d = 139.02\text{mm}$$$

5. 轉換成厚透鏡系統

(1) 確定通光口徑和透鏡厚度

由於入瞳與第一光組重合, 所以 $D_1 = D_\lambda$ 。因 $D/f' = 1/2$, $f' = 150$, 所以 $D_\lambda = 75\text{mm}$, 則 $D_1 = 75\text{mm}$ 。

取 $\delta = 2\text{mm}$, 則第一光組的實際口徑 $D_1 = D_\lambda + \delta = 77\text{mm}$ 。正透鏡的厚度 $d_1 = d_{\min} + K_1 - K_2$, 取 $d_{\min} = 2$,

由 $K_i = r \pm \sqrt{r^2 - (D_p/2)^2}$ 將已知數據代入, 經計算得 $K_1 = 6.52, K_2 = -8.4$, 代入 $d_1 = d_{\min} + K_1 - K_2$ 得

$$d_1 = 16.92\text{mm}, \text{取 } d_1 = 17\text{mm}。用同樣計算方法得 } d_2 = 5\text{mm}, d_4 = 12\text{mm}, d_5 = 5\text{mm}。}$$

(2) 確定間隔 d_3

間隔 d_3 應按下式計算 $d_3 = d + l'_{H1} - l_{H2}$ 式中 l'_{H1} 和 l_{H2} 可用近軸光路計算求出。經計算得

$l'_{H1} = -12.57mm, l_{H2} = 2.4mm, d = 139.02mm$ 。將其代入上式得 $d_3 = 139.02mm - 12.57mm - 2.4mm \approx 124mm$ 。

6. 計算各透鏡的曲率半徑

用 $h_{i+1} = h_i - du_{i+1}$ 和 $r_i = \frac{h_i(n_{i+1} - n_i)}{n_{i+1}u_{i+1} - n_iu_i}$ 計算各透鏡的曲率半徑時，式中的 u_i 角，如果不是在規一化條件下

求出的，則 h_i 應該用實際的光線高度計算。現在利用前面由薄透鏡實際半徑求出的 u 角：

$u_1 = 0, u_2 = 0.1092, u_3 = 0.075, u_4 = 0.1175, u_5 = 0.1588, u_6 = 0.131, u_7 = 0.25$ 取 $h_1 = D_\lambda / 2 = 37.5mm$ ，用公式

$h_{i+1} = h_i - du_{i+1}$ 和 $r_i = h_i(n_{i+1} - n_i) / (n_{i+1}u_{i+1} - n_iu_i)$ 計算各面的曲率半徑，最後得

$r_1 = 116.93, r_2 = -87.868, r_3 = -395.3, r_4 = 108.02, r_5 = -58.16, r_6 = -202.6$ (r 均以 mm 為單位)。整個系統的結構參數見表一，表二則是專利文獻資料中選擇初始結構。

表一、代數法求解初始結構

	RDY	THI	RMD	GLA
OBJ:	INFINITY	INFINITY		
1:	117.07927	35.911889	BALK1_SCHOTT	
2:	-112.00139	5.772139	F4_SCHOTT	
STO:	1535.40477	126.757490		
4:	56.98343	28.762308	BK7_SCHOTT	
5:	-87.56407	5.772139	F2_SCHOTT	
6:	386.20167	41.966167		
IMG:	INFINITY	0.000000		

表二、專利文獻資料中選擇初始結構

	RDY	THI	RMD	GLA
OBJ:	INFINITY	INFINITY		
1:	117.42854	40.000000	BALK1_SCHOTT	
2:	-105.89629	3.600000	F4_SCHOTT	
STO:	-6746.38078	124.215331		
4:	57.44134	40.000000	BK7_SCHOTT	
5:	-57.51926	40.000000	F2_SCHOTT	
6:	50.51206	4.671465		
IMG:	INFINITY	-0.122351		

表三、代數法求解初始結構優化結果

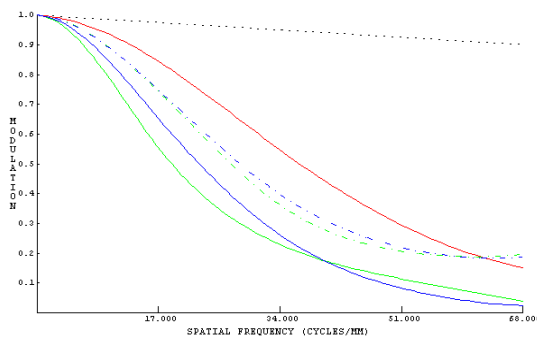
	RDY	THI	RMD	GLA
OBJ:	INFINITY	INFINITY		
1:	115.30687	16.764020	K9_CHINA	
2:	-86.64829	4.930594	F5_SCHOTT	
STO:	-389.81277	122.491075		
4:	106.52055	11.833426	K10_SCHOTT	
5:	-57.35267	4.930594	ZF1_CHINA	
6:	-199.78767	39.151448		
IMG:	INFINITY	-0.120653		

表四、專利文獻資料中選擇初始結構優化結果

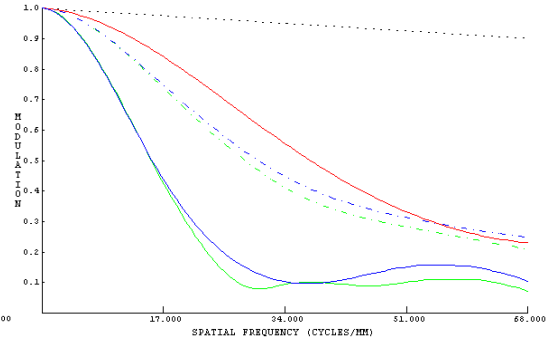
	RDY	THI	RMD	GLA
OBJ:	INFINITY	INFINITY		
1:	112.81732	40.000000	K9_CHINA	
2:	-99.99117	3.800000	F5_SCHOTT	
STO:	-3160.09437	117.921881		
4:	56.96422	40.000000	K10_SCHOTT	
5:	-62.22908	40.000000	ZF1_CHINA	
6:	53.16688	4.545582		
IMG:	INFINITY	-0.136931		

7. 計算系統 MTF

初始結構求出之後在光學軟體[2]上進行優化，比較其 MTF。圖一為代數法求解初始結構之 MTF，圖二則為專利文獻資料中選擇初始結構之 MTF。表三、表四則分別為其結構參數。



圖一、代數法求解初始結構之 MTF



圖二、專利文獻資料中選擇初始結構之 MTF

結論

用代數法求解初始結構的優點在能夠預先評估高級像差對鏡頭系統的影響，進而推算出適當的初級像差來補償，如此就會得到滿意的初始結構。初級像差的性質可幫助了解那些像差是無法校正的，如此便可排除那些無法校正的像差。在設計上，就不會選擇去校正那些已無法改變的像差。

參考文獻

- [1] 張登臣、郁道銀，實用光學設計方法與現代光學系統，機械工業出版社，北京，(1995)
- [2] CODE V 9.30 版使用手冊