

复杂光学系统初始结构的求解方法及程序设计

田铁印

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130022)

摘要 本文叙述了复杂光学系统初始结构求解的重要性,介绍了求解思想,以及程序的设计和用法,并以两个典型实例证明了这种方法的有效性。

1 前言

光学设计,以往由于计算手段条件的限制,运用像差理论进行初始结构求解,往往只限于简单的一组元结构,对于复杂系统由于问题繁琐、计算量大,所以很少有人问津。

随着相关科学的发展,对光学系统成像质量的要求越来越高,求解复杂光学系统的初始结构,有助于这些系统的设计。

2 原理思想

复杂光学系统初始结构求解 应主要考虑如下问题。(1)解决只与结构有关的场曲问题;(2)求得各组元的优化 P^∞ 、 W^∞ 、CI 值;(3)解决满足 P^∞ 、 W^∞ 、CI 值的各组元的具体结构。文献^[2]曾讨论过(3),并能直接给出具有两个单元的薄透镜组的具体结构。这里,经过处理可直接给出具有三个单元的薄透镜组的优化解。

2.1 场曲 S_{IV} 的考虑

通过高斯光学计算,得到场曲系数:

$$S_{IV} = J^2 \sum \frac{\varphi_i}{n_i}$$

J 为不变量, φ_i 为光焦度, n_i 为各组元的等效折射率。以往 n_i 取近似值,这里则用实际计算值来计算。适当选取各组元的偏角 Δu_i 及组元间隔 d_i 满足场曲的校正。

2.2 P^∞ 、 W^∞ 、CI 值的求解

任何复杂的光学系统,都可看作是分离的薄透镜按一定形式排列而成的。其中各组元又可由多个薄透镜单元组成,薄透镜单元可以是单透镜、双胶合或三胶合透镜。

先通过高斯光学计算,对原始像差方程组进行焦距规化,可以得到:

$$\sum S_i = \sum h_i^2 \cdot \Phi_i^3 \cdot \bar{P}_i$$

$$\sum S_I = \sum h_i^3 \cdot h_{p_i} \cdot \Phi_i^3 \bar{P}_i + J \sum h_i^2 \Phi_i^2 \bar{W}_i$$

$$\sum S_{II} = \sum h_i^2 \cdot h_{p_i}^2 \cdot \Phi_i^3 \bar{P}_i + 2J \sum h_i \cdot h_{p_i} \cdot \Phi_i^2 \cdot \bar{W}_i + J^2 \sum \Phi_i$$

$$\sum S_{III} = \sum h_i \cdot h_{p_i}^3 \cdot \Phi_i^3 \bar{P}_i + 3J \sum h_{p_i}^2 \cdot \Phi_i^2 \cdot \bar{W}_i + J^2 \sum \Phi_i / h_i \cdot \Phi_i (3 + \mu_i)$$

$$\sum CI = h_i \Phi_i \sum CI_i$$

$$\sum S_{II} = h_i h_{p_i}^2 \Phi_i \sum CI_i$$

这里 μ_i 值为各组元等效折射率的倒数。再将上述方程进行位置规化,利用公式:

$$\bar{P}_i = P_i^\infty - \bar{u}_i (4W_i^\infty + 1) + \bar{u}_i (3 + 2\mu_i)$$

$$\bar{W}_i = W_i - \bar{u}_i (2 + \mu_i)$$

将单色像差方程组中的 \bar{P}_i 、 \bar{W}_i 用 P_i^∞ 、 W_i^∞ 代换,这样单色像差方程组就表示成了 P_i^∞ 、 W_i^∞ 的函数,而色差方程组又是 CI_i 的函数。利用计算机优化,选取一组较佳解。

2.3 P^∞ 、 W^∞ 、 CI 值求解各组元参数

首先,要选取各组元的具体结构型式。本程序可直接给出这些形式的优化结构参数。如果需要更复杂的结构,则可以将一整组看成两部分然后分别求解。具体公式推导略,基本原理可参考文献^[2]。

3 程序的流程及数据输入、输出

求解复杂系统初始解由以上两大步骤组成,这样程序也是由两大子块来完成。

3.1 P^∞ 、 W^∞ 、 CI 求解子块

流程简图如图 1 所示。程序采用人机对话式数据输入方法。首先输入系统的组元数 M ($M \leq 3$)。然后输入物方孔径角、物距、物高、各组元的偏角以及各组元间隔,最后输入光阑所在位置。处理后将输出各种计算结果,打印出像差方程组,并给出满意的各组元的 P^∞ 、 W^∞ 、 CI 值。

3.2 由 P^∞ 、 W^∞ 、 CI 求具体结构

流程简图如图 2 所示,首先输入薄透镜组的单元数,然后输入整组焦距值、各单元的规化光焦度、玻璃材料、折射率、色散,如要求消二级光谱则输入相对色散。程序最后给出各单元弯曲以及所有的半径值等数据。

4 计算实例

4.1 10 倍投影物镜,共轭距 1200、物高 100、物方孔径角 0.01136,采用图 3 的结构型式。

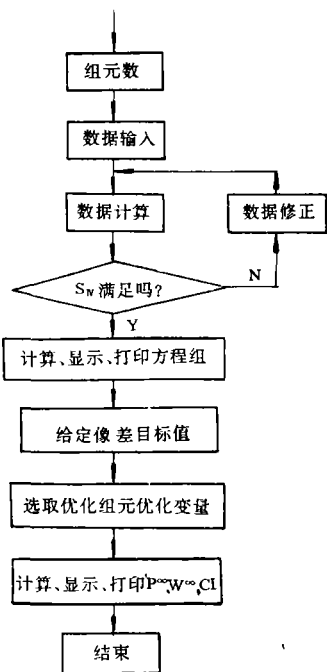


图 1

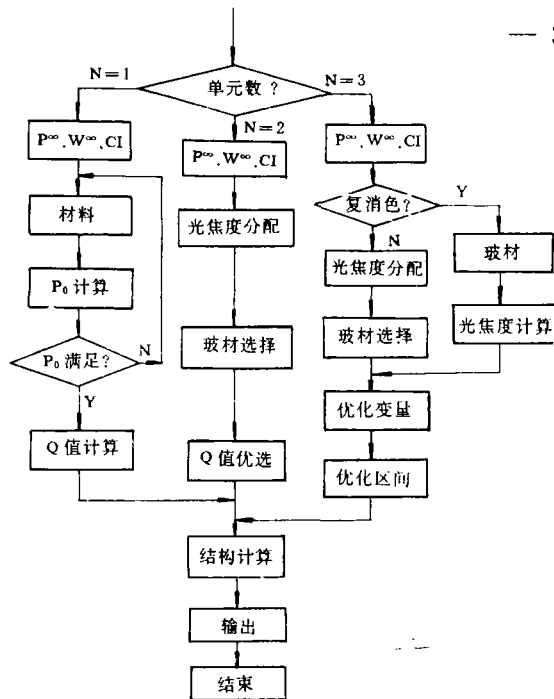


图 2

经初步分析,在程序中输入以下数据:物距 $D_0 = -1000$,物高 $H_0 = -100$,入射孔径角 $U_1 = -0.01136$,各组元的偏角分别为 $0.1, -0.15, -0.175$,各组元间隔为 $25, 60$,光阑在第二组后 15mm 处,运行程序得见表 1。

其中 LH 为系统的前主面距, LHP 为系统的后主面距, LP 为入瞳位置, F_{ai} 为各组实际光焦度, $h_i * f_{ai}$ 为各组元的偏角, D_1 为后工作距, H_1 为像高, F 为系统总焦距, $F(i)$ 分别为各组元焦距。

表 1

$D_0 = -1000$	$H_0 = -100$	$U_1 = -0.01136$				
$LH = 109.4391$	$LHP = 1.956809$	$LP = 54.95549$				
THE SPACES:	$D_1 = 25$	$D_2 = 60$				
APERTURE POSITON: 2,15						
i	u_i	u_{pi}	h_i	h_{pi}	f_{ai}	$h_i * f_{ai}$
1	-0.0113600	-0.094707	11.360000	-5.2092720	0.0088028	0.1000000
2	0.0886400	-0.1406470	9.1439990	1.6930970	-0.01664042	-0.1500000
3	-0.0613600	-0.1128731	12.8256000	5.0792900	0.0136446	0.1750000
4	0.11364	-0.0435683				
$D_r = 112.8617$	$H_r = 9.996481$	$J = 1.136$				
$S_4 = 4.913199E-03$	$ZC = 6.043203E-03$	$F = 100.8258$				
$F(1) = 113.6$	$F(2) = -06.96001$	$F(3) = 73.28915$				

EQUATION IN INFINITE OBJECT

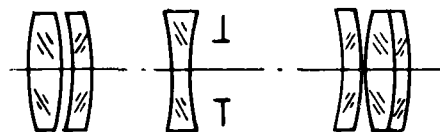


图 3

$S_1 = +0.01136000P$	$1 + 0.00516198W$	$1 - 0.03086098P$	$2 - 0.07294715W$	$2 + 0.06873719P$	3
		$0.09649489W$	$3 - 0.00157052$		
$S_2 = -0.00520927P$	$1 + 0.00899291W$	$1 + 0.00571420P$	$2 + 0.03906683W$	$2 + 0.02722181P$	3
		$+0.07296898W$	$3 + 0.11021040$		
$S_3 = +0.00238878P$	$1 - 0.0093308W$	$1 - 0.00105804P$	$2 - 0.001196626W$	$2 + 0.01078059P$	3
		$+0.04267551W$	$3 + 0.02330258$		
$S_5 = -0.00109540P$	$1 + 0.00666858W$	$1 + 0.00019591P$	$2 + 0.00309196W$	$2 + 0.00426941P$	3
		$+0.02235706W$	$3 + 0.04627142$		
$C_1 = +1.13600000CI$	$1 - 1.37160000CI$	$2 + 2.24448000CI$	3		
$C_2 = -0.5092710CI$	$1 + 0.2539640CI$	$2 + 0.88887560CI$	3		

$P_1 = 0.9877618$	$P_2 = 2.747293$	$P_3 = 2.016218$
$W_1 = -0.8738662$	$W_2 = -1.30647$	$W_3 = -1.6$
$P_0 = 0.529986$	$P_0 = 1.590739$	$P_0 = 0.204358$

$C_1 = 2.285918E-02$	$C_2 = 0.027839$	$C_3 = 5.44266E-03$
----------------------	------------------	---------------------

根据表 1 计算得到的各组 $P^\infty, W^\infty CI$, 计算具体结构得见表 2。

表 2 第一组元

$T(1) = 0.530351$	$T(2) = 0.4696491$	$N_1(k9) = 1.5163$	$N_2(zf2) = 1.6725$
$U_1 = 0$	$U_2 = 1.129249$	$P = 0.9877618$	$W = -0.8738662$
$u = 0.6305731$	$Q_1 = -1.59609$	$Q_2 = -1.004853$	$F = 113.6$
$R_1 = 159.8551$	$R_2 = -358.845$	$R_3 = 163.1988$	$R_4 = -49841.8$

第二组元

$GJD = 1$	$F = -60.96001$	$P_z = 0$	$W_z = 0$
$N_1(F5) = 1.62435$	$N_2(0) = 10$	$V_1 = 35.92$	$V_2 = 0$
$T_1 = 1$	$U = 0$	$C_1 = 2.783965E-02$	$C_z = 0$

$Q = -1.8$	$P = 2.747292$	$W = -1.30647$	$P_0 = 1.580122$
$R_1 = -76.04166$	$R_2 = 76.20002$	$R_3 = 76.20002$	

第三组元

$T(1) = 0.5$	$T(2) = 0.5$	$U(1) = 0$	$U(2) = 1$
$N_1(k9) = 1.5163$	$N_2(0) = 10$	$N_3(k9) = 1.5163$	$N_4(zf2) = 1.6725$
$V_1 = 64.1$	$V_2 = 0$	$V_3 = 64.1$	$V_4 = 32.2$
$P = 2.016218$	$W = -1.6$	$CI(1) = 1.560063-02$	$CI(2) = -4.715305-03$
$G(1) = 1$	$GJ(1) = 0$	$G(2) = 2.314498$	$GJ(2) = -1.314498$

$u = 0.699982$	$u_1 = 0.6595001$	$u_2 = 0.7404638$
$Q_1 = -3.786873$	$Q_2 = -4.845123$	$F = 73.28915$
$R_1 = -172.4421$	$R_2 = -52.59597$	$R_3 = -52.59597$
$R_4 = 75.08248$	$R_5 = -57.92179$	$R_6 = -254.4848$

表 2 中的各组半径 R 就是我们要求复杂光学系统的具体结构数据,其中 $T(I)$ 为各单元的规化光焦度, μ_i 为各组等效折射率的倒数, Q 为弯曲值, R 为半径。当折射率 $N=10$ 。色散 $V=0$ 则表示前一单元为单透镜形式。

为了说明这种方法的有效性,我们把求得的结构参数输入到 CAOD 中,计算得到像差系数见表 3。

表 3

<i>DOF</i>	<i>DHO</i>	<i>FLO</i>	<i>DFI</i>	<i>DHI</i>
8.6718	109.5025	-100.8307	102.7371	1.9064
<i>EFL</i>	<i>U₁</i>	<i>DIMA</i>	<i>MAG</i>	<i>J</i>
100.8307	0.113641	112.8165	-0.1000	1.1360
<i>DPO</i>	<i>DPI•</i>	<i>SINUPO</i>	<i>SINUPI</i>	<i>HIMA</i>
55.0058	-116.6876	-0.094363	-0.043362	9.0064

PRIMARY ABERRATIONS:

<i>N_o</i>	<i>S₁</i>	<i>S₂</i>	<i>S₃</i>	<i>S₄</i>	<i>S₅</i>	<i>C₁</i>	<i>C₂</i>
1	0.001727	0.001297	0.000974	0.002749	0.002795	0.004972	0.003733
2	0.001873	-0.003398	0.006166	0.001225	-0.013434	0.004423	-0.008026
3	-0.000089	-0.000277	-0.000859	0.003180	0.007158	0.003957	0.012298
4	0.005113	-0.008064	0.012718	0.000010	-0.020138	0.012589	-0.019855
5	-0.033302	0.025865	-0.020088	-0.006522	0.020691	-0.020419	0.015859
6	-0.019971	-0.009944	-0.004951	-0.006509	-0.005710	-0.017723	-0.008824
7	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
8	0.000039	-0.000249	0.001588	-0.002548	0.006001	-0.000888	0.005655
9	0.064970	0.004404	0.000298	0.008354	0.000587	0.018380	0.001246
10	0.006317	0.006345	0.006374	0.005852	0.012257	0.009845	0.009890
11	-0.055074	-0.010937	-0.002172	-0.001372	-0.000703	-0.0411319	-0.008206
12	0.029361	-0.004203	0.000602	0.002039	-0.000379	0.026227	-0.003754
<i>Coef:</i>	0.000963	0.000838	0.000649	0.006458	0.009125	0.000044	0.000015
<i>Aber:</i>	0.037284	0.000369	0.050252	0.250034	0.004016	0.003421	0.000135

4.2 反远系统,全视场 15°,相对孔径 1/3,焦距 90,后工作距 115,采用图 4 的结构型式。

输入以下数据:物距 $D_0=0$ (平行光),视场角 $UPO=-7.5^\circ$,入射高 $H_1=15$ 两组间隔 $D_1=45$,光栏在第二组前 20mm 处,各组偏角分别为 -0.12 、 0.286 ,运行程序得到表 4。同理得到表 5、表 6。

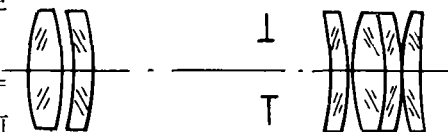


图 4

表 4

$D_0=0$	$UPO=-7.5$	$H_1=15$
$LH=57.00744$	$LHP=32.53011$	$LP=20.83333$
THE SPACES:	$D_1=45$	
APERTURE POSITION: 2, -20		

i	u_i	u_{pi}	h_i	h_{pi}	f_{ai}	$h_i * f_{ai}$
1	0.00000000	-0.1308996	15.0000000	-2.7270750	-0.0080000	-0.1200000
2	-0.1200000	-0.1090830	20.4000000	2.1816600	0.0140196	0.2860000
3	0.166000	-0.0784970				

$D_I=122.8916$	$HI=11.82828$	$J=1.963494$
$S_1=1.462069E-02$	$ZC=6.019609E-03$	$F=90.36144$
$F_{(1)}=-125$	$F(2)=71.32867$	

EQUATION IN INFINITE OBJECT:

$S_1=-0.02592000P$	$1+0.47723060P$	$2+0.80094640W$	$2+0.57830570$
$S_2=+0.00471238P$	$1+0.02827431W$	$1+0.05103701P$	$2+0.24626250W$
$S_3=-0.00085673P$	$1-0.01028082W$	$1+0.00545811P$	$2+0.04351219W$
$S_4=+0.00015576P$	$1+0.00280366W$	$1+0.00058371P$	$2+0.00649023W$
$C_1=-1.80000000CI$	$1+5.83440000CI$	2	
$C_2=+0.32724890CI$	$1+0.62395480CI$	2	

$P_1=-0.174352$	$P_2=1.128386$
$W_1=1.444372$	$W_2=-1.4$
$P_0=-2.308045$	$P_0=-0.2210742$

$CI_1=0$	$CI_2=.0$
----------	-----------

表 5 第一组元

$T(1)=2.009404$	$T(2)=-1.009404$	$N_1(k9)=1.5163$	$N_2(xf2)=1.6725$
$U_1=0$	$U_2=-1.990683$	$P=-0.1743452$	$W=1.444372$
$u=0.7216722$	$Q_1=-1.753588$	$Q_2=-0.8663321$	$F=-125$
$R_1=-52.57249$	$R_2=82.54842$	$R_3=76.41063$	$R_1=926.441$

第二组元

$T(1)=0.5384616$	$T(2)=0.4615385$	$U(1)=0$	$U(2)=1.166667$
$N_1(k9)=1.5163$	$N_2(0)=10$	$N_3(k9)=1.5163$	$N_4(xf2)=1.6725$
$V_1=64.1$	$V_2=0$	$V_3=64.1$	$V_4=32.2$
$P=1.128386$	$W=-1.4$	$CI(1)=1.560063E-02$	$CI(2)=-3.6401146E-02$
$G(1)=1$	$GJ(1)=0$	$G(2)=4.364682$	$GJ(2)=-3.364682$

$u=0.7551495$	$u_1=0.6595001$	$u_2=0.8667402$
$Q_1=-4.888765$	$Q_2=-9.979559$	$F=109.7364$
$R_1=-104.4088$	$R_2=-52.40641$	$R_3=-52.40641$
$R_4=83.7517$	$R_5=-42.34505$	$R_6=-388.7333$
$N_s(k9)=1.5163$	$R_7=217.5314$	$R_8=-203.7962$
$Q_3=-2$	$T(3)=0.35$	$R_9=203.7962$
$P=-5.174151E-02$	$W=-16480832$	$CI_2=-8.400336E-03$

表 6

DFO	DHO	FLO	DFI	DHI
-33.2788	57.0366	-90.3154	122.8437	32.5282
[Press<Enter>to continue]				
EFL	UI	DIMA	MAG	J
90.3154	0.166085	122.8437	0.0000	1.9748
DPO	DPI	SINUPO	SINUPI	HIMA
20.8462	-27.8606	-0.130526	-0.078223	11.8903

PRIMARY ABERRATIONS:

No	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	C ₁	C ₂
1	-0.078239	0.049984	-0.031934	-0.025258	0.036472	-0.0222726	0.014519
2	-0.474936	-0.060467	-0.007698	-0.016086	-0.003041	-0.033683	-0.004288
3	0.580446	0.067932	0.007950	0.020522	0.003344	0.081864	0.009581
4	-0.022531	-0.017508	-0.013605	-0.001693	-0.011990	-0.025483	-0.019802
5	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
6	0.002776	-0.003236	0.003771	-0.012718	0.010269	-0.008173	0.009525
7	0.212330	-0.032497	0.004974	0.025338	-0.004631	0.040035	-0.006127
8	0.093389	0.043972	0.020704	0.015855	0.017197	0.028548	0.013442
9	-0.501384	0.004006	-0.000032	-0.005672	0.000046	-0.122253	0.000977
10	0.015749	-0.011076	0.007790	0.004034	-0.008349	0.030145	-0.021201
11	-0.000256	-0.000911	-0.003238	0.006104	0.009904	0.003014	0.010718
12	0.168180	-0.042664	0.010823	0.006516	-0.004422	0.028838	-0.007316
Coef:	-0.004474	-0.002464	-0.000494	0.016941	0.044798	0.000128	0.000027
Aber:	-0.081105	-0.000624	-0.017904	0.307086	0.011342	0.004656	0.000164

5 结束语

通过上面的实例和工作中的应用,利用上述程序求得的初始结构均能满足初级像差的要

求,如果合理选取各薄透镜组的单元数,并选取合适的玻璃材料,把高级像差控制在一定范围内,求得的初始结构不经多大的改动,就能达到我们的设计要求。值得说明的是,在结构相同,玻璃材料相同的情况下,利用本程序求解可以达到系统的最优化或接近最优化,而采用其它方法,则很难达到这一点。

本工作得到过史光辉、尤英奇、杜温锡、杜效良以及王立升等许多老师们的指导和帮助,在此表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1]王之汇,《光学设计理论基础》,科学出版社,1965年
- [2]史光辉,仪器仪表学报,1988年4期
- [3]张冀恩,高倍平场复消色差显微物镜设计,长春光机所硕士论文,1990

Calculation and Design of Programme for Initial Structure of Complicated Optical System

Tian Tiejin

(Changchan Institute of Optics and Fine Mechanics Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

This paper describes the importance of calculation for the initial structure of complicated optical systems, introduces the considerations well as the design and the usage of the programme, finally, two examples, proves the effectiveness of this method.