

# 光学自动设计双优选阻尼最小二乘法

姚 多 舜  
(西安应用光学研究所)

## 提 要

本文提出了象差权重匀化因子的概念,以解决阻尼最小二乘法光学自动设计中象差权重的自动给定和优化问题。象差权重匀化因子的自动调整还可在优化过程中出现的价值函数局部极值自动脱出。本文对程序作了简要描述,还给出了计算实例。

阻尼最小二乘法光学自动设计的关键在于对象差权重和自变量阻尼因子的选择得当。关于自变量阻尼因子的自动选择方法已有大量文献介绍<sup>[1~3]</sup>,本文试图利用象差的相对剩余量自动给定并优化象差权重,以求自动设计进一步自动化。

## 一、象差权重的自动给定方法

设系统的实际象差值及其目标值分别为  $e_i$  和  $t_i$ ,  $\Delta f_i > 0$  为对应象差的公差容限,根据定义得象差公差  $\rho_i$  和象差的相对剩余量为

$$\rho_i = \frac{|e_i - t_i| - \Delta f_i}{\Delta f_i}, \quad (1)$$

$$f_i = \frac{|\rho_i| + \rho_i}{2}. \quad (2)$$

我们在这里通过用象差的相对剩余量构造价值函数,其优点是:(1)实际上,要求所有象差都绝对达到目标值既不可能也不必要。若在价值函数中考虑了公差的作用,就不致使有些象差早已进入公差带还无休止地向目标值接近,而另一些象差依然停留在公差带以外收敛缓慢而影响优化速度;(2)象差的相对剩余量都是无量纲的相对值,它的大小仅仅表示其对公差带的接近程度,而与象差种类无关。这为象差权重的自动给定提供了有利条件;(3)如把价值函数表示成

$$\phi = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M f_i^2, \quad (3)$$

便可表示平均每个象差的相对剩余量。这对不同系统的最后校正质量便于作相互对比。

由于用这样的方法构造的价值函数中不含象差权重因子,为了调节各象差的不同收敛速度,必须在该方程中加进权重因子的影响,如

$$(W^T A^T A W + p^2 Q)(X - X_0) = -W^T A^T W F_0, \quad (4)$$

式中  $W$  为一对角矩阵,其中元素  $w_i$  就是对应象差的权重因子。由于象差相对剩余量  $f_i$  是以象差公差为依据的,这本身就反映了不同象差的相对重要性。每次迭代前象差相对剩余

量正是本次迭代中所要矫正的量,它的大小也应表示本次迭代中的收敛速度。因此,用每次迭代前的象差相对剩余量作为本次迭代的象差权重是合适的。即

$$w_i = \frac{f_{0i}}{\sum_{j=1}^M f_{0j}}, \quad (5)$$

这样就解决了象差权重的自动给定问题。同时也解决了各不同迭代阶段自动调整象差权重的问题。

## 二、象差权重的优选及局部极值的自动脱出

众所周知,阻尼最小二乘法的主要缺点就是价值函数容易陷入局部极值。因为该方法本身就是把非线性问题变成线性逼近,逐步迭代过程。再加上对公式的多次简化,势必计算误差较大,使优化过程进入不应有的死点,这就是造成迭代过程中形成价值函数局部极值的原因。此外,使迭代陷入局部极值的因素尚有与迭代中使用的阻尼因子、象差权重因子以及形成微分矩阵  $A$  所使用的自变量微分步长等。因此,只要改变这些特定条件就可以从局部极值中跳出来。本文采取破坏造成陷入局部极值的平衡条件,在局部极值处更换条件重新优化的办法,实践证明这对自动脱出局部极值是有效果的。在局部极值处更换条件有两个办法:(1)重新调整微分步长,即重新修改微分矩阵  $A$ ,再行求解。这个办法通常是有效的,只是计算量大一些;(2)调整本次迭代的象差权重。当然,如果孤立地调整各象差权重是困难的。本文提出对所有各象差权重加上一个常数  $K_w$ ,如下式那样,

$$w_i = \frac{f_{0i} + K_w}{\sum_{j=1}^M (f_{0j} + K_w)}. \quad (6)$$

由于权重就是表示相对关系的相对量,因而对它们同加一常数再归一化,就相当于改变了它们之间的对比度,使之均匀化,因此可称常数  $K_w$  为象差权重的匀化因子,或简称权匀化因子。权匀化因子和自变量阻尼因子一起控制着各象差以不同速度向目标值逼近。以上两个方法交替使用,一般说来对程序中价值函数局部极值的自动脱出是有作用的。

## 三、程序的描述

使用自动优选自变量阻尼因子和自动优选象差权重匀化因子的双优选阻尼最小二乘法光学自动设计程序是一个双因素优化问题的应用程序。这个程序比起过去靠人工给定  $M$  个权重因子以及一个自变量阻尼因子的  $M+1$  个因素的优化程序要优越得多,不仅自动化程度高,而且程序收敛得快。由于本方法应用权匀化,因此  $K_w$  有利于价值函数从局部极值自动脱出,使程序扩大了使用范围。但由于程序迭代中并不总会陷入局部极值,而且使用双因素优选总比单因素优选花费时间长,因而本程序分成两个步骤进行:第一,在价值函数下降较快时,只对自变量阻尼因子  $p$  进行单因素优选,此时象差权重因子按公式(5)自动给定。第二,若价值函数下降缓慢,即认为接近局部极值,此时首先调整微分步长,重新迭代。若仍无效,再发挥权匀化因子  $K_w$  的作用,按公式(6)求解象差权重,进行双因素优选,以便自动

脱出局部极值。

关于微分步长的选取,在第一次迭代时一律选取  $10^{-5}$ ,在以后的迭代中则可用前次迭代解向量值的  $1/10$  作为下次迭代的微分步长值。在出现局部极值时,为调整微分步长,再令所有微分步长值都等于  $10^{-5}$ 。这样收到的效果一般较好。

对改变量  $p$  或  $K_w$  的优选方法通常有  $\theta$  判别法和二次曲线拟合法<sup>[4]</sup>,本程序使用优先系数法<sup>[5]</sup>效果也很好。

在本程序中自变量阻尼因子和象差权匀化因子虽然都由程序自动给定,但也能充分发挥光学设计者的丰富经验,使之更进一步地挖掘程序的潜力,因为对系统可控象差的选择,对象差目标值及其公差容限的确定都是由人决定的。

#### 四、计算实例

为验证用双优选阻尼最小二乘法进行光学自动设计的可行性和实用性,在国产 TQ-16 电子计算机上编制了应用程序,计算了一系列例题。现仅举一例加以说明。

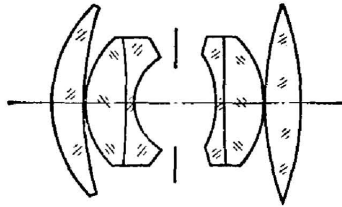


图1 双高斯物镜结构图

Fig. 1 Sketch of design of double Gauss lens

设有一双高斯物镜,其原始结构方案如图1所示,初始结构参数如表1所示。系统性能参数为:视场角  $2\omega=40^\circ$ ,相对孔径  $f:2$ 。对系统象差(包括约束条件)要求为  $f'=50\pm 0.5$ ,  $\delta l'=0\pm 0.25$ (满孔径),  $x'_s=0\pm 0.33$ (全视场),  $\Delta x'=0\pm 0.2$ (全视场),  $[K'_T=0\pm 0.025$ (全视场满孔径)]。经自动优化,各次迭代后价值函数及受控象差值如表2所示。最后结果全部满足要求。优化后的结构参数如表3所示。

此外,为便于分析对比,用本例初始数据和象差要求分别应用一般阻尼最小二乘法和适应法光学自动设计程序在 DJS-8 电子计算机上进行了优化设计。结果表明,它们都比双优选阻尼最小二乘法收敛速度慢。它们在每次迭代后象差值如表4所示。如果在这两个方法计算的每次迭代结果,按公式(3)算出相应的价值函数列于表5可比较其收敛速度。在图2中分别以迭代次数和优

表1 双高斯物镜初始结构参数

Table 1 Initial parameters of double Gauss lens

$R$	$d$	玻 璃
28.94	5.5	ZK11
83.26	0.1	
17.20	7.5	ZK7
112.39	2.0	F5
11.43	7.8	
光 阑	7.8	
14.05	2.0	F5
-315.41	7.5	ZK7
-18.90	0.1	
70.26	7.2	ZK11
-53.18		

表 2 各次迭代价值函数及象差值

Table 2 Merit function and aberrations at each iteration

名 称	优 化 前	第一次迭代	第二次迭代	最后结果
$\phi$	25.06	0.561	0.049	0
$f'$	54.57	50.60	50.72	50.50
$\delta l'$	-1.257	-0.664	-0.293	-0.247
$x'_s$	0.291	-0.092	-0.036	-0.051
$\Delta x'$	0.606	0.209	0.029	0.004
$K'_T$	-1.170	0.029	-0.029	-0.024

表 3 双高斯物镜结构参数

Table 3 Resulting parameters of double Gauss lens

$R$	$d$	玻 璃
28.78	5.50	ZK11
86.97	0.10	—
17.86	7.04	ZK7
83.35	2.00	F5
11.25	6.73	—
光阑	7.47	—
-14.52	2.00	F5
46.84	6.93	ZK7
-18.76	0.10	—
57.98	7.20	ZK11
-52.53		

表 4 使用一般阻尼最小二乘法及适应法各次迭代象差值

Table 4 Changes of aberrations obtained by using the DLS method and adaptive method at each iteration

优化方法	象 差	迭 代 次 数			
		1	2	3	4
阻尼最小二乘法	$f'$	52.41	51.81	50.40	50.15
	$\delta l'$	-0.63	0.41	0.24	0.088
	$x'_s$	0.18	0.033	0.303	0.303
	$\Delta x'$	0.06	0.052	0.210	0.204
	$K'_T$	0.027	0.015	0.026	0.026
适 应 法	$f'$	51.64	50.55	48.76	49.49
	$\delta l'$	0.47	0.197	0.426	0.246
	$x'_s$	0.092	0.190	0.411	0.334
	$\Delta x'$	0.08	0.138	0.257	0.215
	$K'_T$	0.014	0.0015	0.033	0.006

化时间为坐标画出了价值函数的收敛情况。

显然,双优选阻尼最小二乘法要比一般阻尼最小二乘法和适应法的收敛速度快,这是因为双优选阻尼最小二乘法在每次迭代中都能及时根据剩余象差的变化给予较合适的权重因子所致。

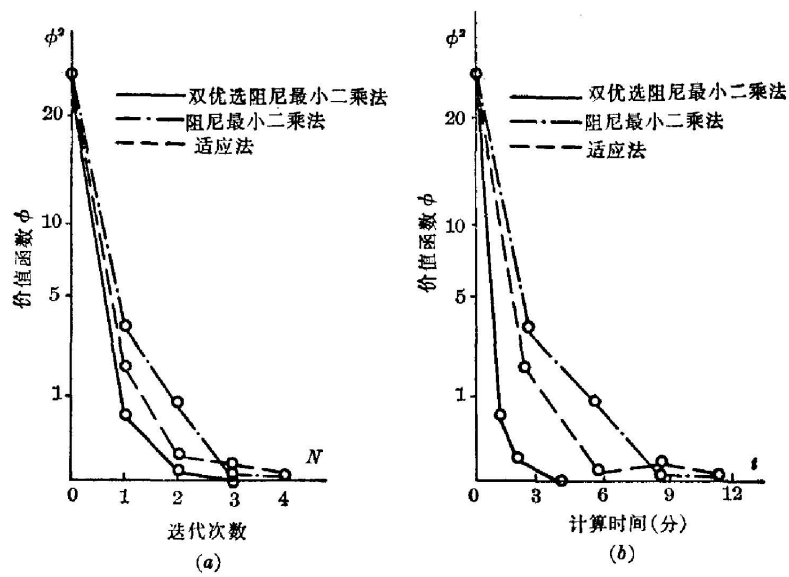


图 2 三种方法价值函数收敛情况

Fig. 2 Convergence of merit function for three different methods

表 5 三种方法价值函数值

Table 5 Merit function obtained by using three different methods of optimization

优 化 方 法	各 次 迭 代 价 值 函 数			
	1	2	3	4
双优选阻尼最小二乘法	0.5614	0.0494	0	—
阻尼最小二乘法	3.3806	1.0150	$8 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-4}$
适 应 法	1.1946	$2 \times 10^{-3}$	0.586	$1.18 \times 10^{-3}$

## 参 考 文 献

- [ 1 ] C. G. Wynne; *Proc. Phys. Soc.*, 1959, **73**, No. 473 (May), 777.  
 [ 2 ] J. Meriron; *J. O. S. A.*, 1965, **55**, No. 9 (Sep), 1105.  
 [ 3 ] D. R. Buchele; *Appl. Opt.*, 1968, **7**, No. 12 (Dec), 2433.  
 [ 4 ] M. J. Kidger, C. G. Wynne; *Optica Acta*, 1967, **14**, No. 3 (Jul), 279.  
 [ 5 ] K. D. Sharma; *Optica Acta*, 1981, **28**, No. 7 (Jul), 871.

## Double optimization damped least squares method for automatic lens design

YAO DUOSHUN

*(Xian Institute of Applied Optics)*

(Received 13 August 1983; revised 26 October 1983)

### Abstract

In order to solve the problem of automatic optimization of the weighting factor in the DLS method for automatic lens design, the concept of the uniformizing factor of weight is proposed in this paper. The merit function could be made automatically out of false local minimum during optimization by means of automatic adjustment of the uniformizing factor of weight in the program. The program and a practical example are also given in this paper.