

# 实现全局优化的一种新途径

李 林 袁旭沧

(北京理工大学工程光学系, 北京 100081)

**摘 要** 提出了一种在光学自动设计中寻求全局优化的新方法:随机抽样法. 在与国外流行的模拟退火法作比较讨论的基础上, 给出了两个设计实例: 双单透镜和双高斯照相物镜, 证明本方法是切实可行的.

**关键词** 光学设计, 全局优化, 模拟退火, 随机抽样.

## 1 引 言

自 50 年代以来, 像差自动设计方法逐步趋向完善和实用化. 现在得到广泛应用的有三种方法: 阻尼最小二乘法、正交化法和适应法. 然而, 应用像差自动设计程序进行设计的过程中, 设计成功与否在很大程度上依赖于初始系统的选择. 若选择不当, 则往往会陷进某一个局部极值而无法跳出来. 需要光学设计者凭借扎实的光学设计理论知识丰富的设计经验进行人工干预, 例如改变初始结构参数、改变权因子或改变抽样光线数等, 以达到跳出此局部极值和寻求全局优化的目的. 这个过程受诸多因素影响, 往往是一个冗长而复杂的过程, 即使对经验丰富的专业设计者也不是一件容易之事. 80 年代以来, 美、英等国的光学工作者开始寻求能自动跳出局部极值以达到全局优化的方法. 早在 50 年代, Metropolis 等人曾就热力学与统计物理学中在给定温度的平衡状态下求物质的能量分布问题提出过一种修改的 Monte Carlo 法<sup>[1]</sup>, 1983 年 Kirkpatrick 等人将 Metropolis 算法应用到优化方法中, 提出了模拟退火优化方法<sup>[2]</sup>, 此后 Bohachevsky 和 Viswanathan 等人将模拟退火应用到光学自动设计优化程序中<sup>[3]</sup>, Weller 和 Hearn 等人也对模拟退火作过深入研究<sup>[4,5]</sup>. 应用模拟退火, 原则上可以跳出局部极值, 然而通常很难找到全局极值<sup>[2~5]</sup>, 因为此算法对于内部参数很敏感, 当自变量空间变大时效率很低. Sturlesi 和 D' shea 于 1989 年提出了一种实现全局优化的算法<sup>[6]</sup>, 其缺点是计算量大, 效率低.

本文在综合研究国外上述最新成果的基础上, 提出了一种新的算法: 随机抽样法.

## 2 用随机抽样法实现全局优化

模拟退火带有较大的盲目性, 且只能在局部极值的附近进行搜索, Sturlesi 提出的全局优

化算法效率太低. 怎样设法在大范围内实现全局优化且效率较高呢? 问题的关键是能否采用一种方法把每个极值点附近的系统找出来. 基于上述设想作者采用随机抽样的方法, 首先产生一均匀随机数, 给出一定的合适步长, 对自变量空间进行随机抽样, 得到很多初始结构系统. 随机数  $P_i$  的产生可以采用素数模乘同余法<sup>[8]</sup>

$$a[P_{i-1} \pmod b] - k_1c \quad k_1 - k_0 = 0$$

$$a[P_{i-1} \pmod b] - k_1c + l \quad k_1 - k_0 = 1$$

$$k_0 = \lfloor \frac{aP_{i-1}}{ab+c} \rfloor, \quad k_1 = \lfloor \frac{P_{i-1}}{b} \rfloor$$

对于一般的计算机,  $a = 16807, b = 127773, c = 2836, l = 2^{31} - 1$ . 自变量矢量  $\Delta X$  的抽样采用下式:  $\Delta X = |P_i(\frac{\Delta X_1}{\delta X_1}, \frac{\Delta X_2}{\delta X_2}, \frac{\Delta X_3}{\delta X_3} \dots \frac{\Delta X_n}{\delta X_n})|^T$ , 其中  $\Delta x_i$  为第  $i$  个自变量的增量,  $\delta x_i$  为第  $i$  个自变量的单位,  $n$  为自变量个数. 对于评价函数抽样光线的选择, 本文选择了四种典型的系统: 一般系统, 大视场系统, 大孔径系统, 大视场大孔径系统, 把这四种系统的归化抽样光线与权因子建成了四个开放的文件, 使用者可以根据情况直接采纳, 也可以修改后使用. 当步长给出得合适, 并且抽样次数取得足够大时, 则所抽样出的结构系统在解空间每个局部极值附近都将会分布, 即在解空间每个局部极值附近的分布将是遍历的. 对于一般的光学系统, 自变量空间一般都很大, 随机抽样出来的系统数量非常庞大, 而且很多是不合理的或者在结构型式上是重复的, 若不加区分地一律采纳显然是不可想象的. 为此须进行推理判断, 筛选掉那些明显偏离设计思想的不合理的或重复的系统. 为提高效率, 采用了多级筛选, 在初级筛选中, 只判断其光焦度与需要的光焦度是否偏离过大, 因为若光焦度差别太大, 则其评价函数就不能反映其真实状态下的值, 即判断

$$|(f' - f_0)/f'| \leq \Delta f$$

其中  $\Delta f$  为光焦度允差,  $f_0$  为所要的焦距,  $f'$  为抽样出来的系统的焦距. 图 1 是对一双高斯照相物镜进行随机抽样时随机抽样数与抽样出来的合格系统及允许的光焦度允差之间的关系图. 不同的系统此曲线关系略有差异, 但趋势是相同的. 从图中可看出,  $\Delta f$  控制在 0.1~0.2 之间是比较合适的, 作者曾就典型的光学系统作过大量实验, 抽样出来的系统在 30~70 之间时都能包括最优系统. 抽样出来的系统数过小将有可能漏掉最优系统, 过大又将浪费许多机时判断, 因此, 选择随机抽样数及光焦度的允差是否恰当对于提高效率是非常重要的.

初级筛选可以筛选掉很大一部分系统, 在以后的多级筛选中, 可进一步采用系统的边界条件等判据进行优选. 多级筛选包括:

- 1) 最小边缘厚度检查: 检查每个边缘厚度  $d_{min}$  是否小于国标要求的最小厚度  $d_{g_{min}}$
- 2) 最大或最小中心厚度检查: 检查每个中心厚度是否小于国标要求的最小厚度或是否过大, 以至改变了原有的基本结构型式.
- 3) 重复冗余系统检查: 检查是否有多余重复的系统. 为此给每个面赋予一个符号 Sign, 对每个面进行符号检查.

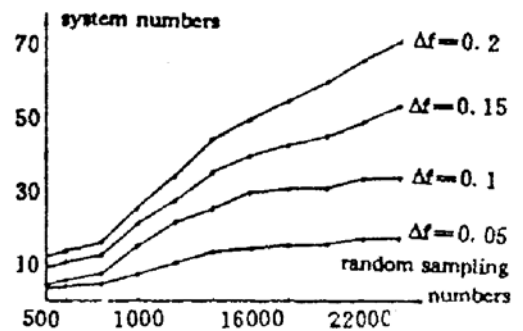


Fig. 1 The relationship of system numbers random sampling numbers and deviation of focal length

$$Sign_{it} \times Sign_{jt} \quad i = 1, \dots, j; l = 1, \dots, k$$

式中  $k$  为面数,  $j$  为已选出的系统数, 将当前正在筛选的系统每个面与已选出的系统相对应的每个面进行比较, 若不一样则保留, 否则将筛选掉. 在整个筛选判断过程中, 都不进行评价函数的计算, 因为评价函数的计算时间冗长, 而且此时由于系统结构分布随意, 评价函数也不能真实反映系统的像差自动校正完成以后的性能. 在筛选以后, 剩下的系统就可以作为像差自动校正的初始系统, 这时可采用常规的阻尼最小二乘法或适应法等像差自动平衡程序进行优化, 评价函数最小者即为全局最优的系统.

本算法采用 C 语言编程实现, 在抽样、筛选以及优化过程中, 均没有暂停, 不必进行人工干预. 其流程图可用图示为

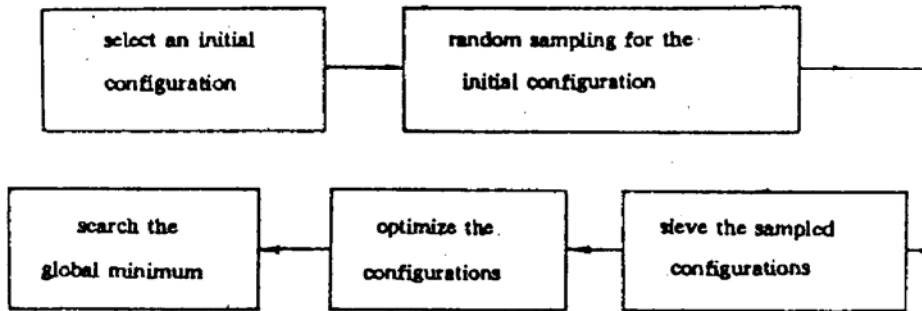


Fig. 2 Flow diagram for the random sampling method

### 3 实 例

采用随机抽样法可以有效地实现全局优化. 下面给出两个设计实例.

#### 3.1 双分离单透镜系统

双分离单透镜系统如图 3 所示, 其结构参数如表 1 所例. 这个系统是 Hopkins 推荐的作为寻求全局优化的一个典型例子<sup>[4]</sup>. 其光学特性为视场角  $2\omega = 11^\circ$ , 口径  $D = 49.8$ , 物镜  $l = \infty$ , 焦距  $f' = 500$ .

Table 1

radius (mm)	thickness (mm)	glass
$\infty$	10	k9
$\infty$	0.1	
$\infty$	5	ZF2
-305.5		

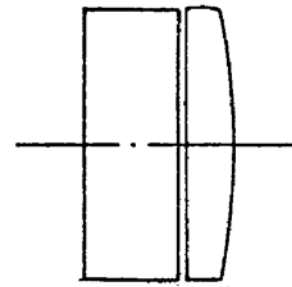
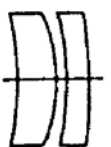
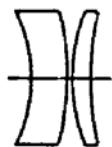
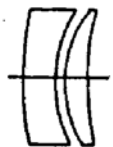
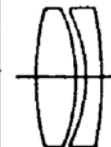
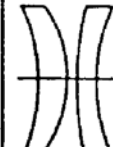
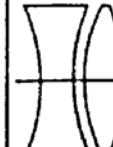
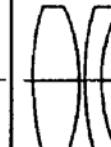
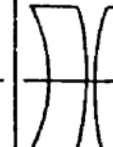


Fig. 3 Doublet

采用随机抽样法对原始系统进行随机抽样, 并进行筛选判断, 筛选掉重复的系统和不合理的系统, 然后进行像差自动平衡, 得到八个系统如表 2 所列. Weller 曾利用模拟退火法对这样的系统作过优化设计<sup>[4]</sup>, 他得到了四个结果, 而本文除此之外还得到了其它四个结果. 值得指出的是, Hopkins 推荐的这个系统的全局最优型式应该是 Fraunhofer 型式, 而这正是表 2 中图 4 评价函数最小(11.58)的系统. 可见, 本方法成功地找出了全局最优系统.

Table 2

system configuration								
iteration	44	9	10	15	23	23	15	46
merit function	353	204.2	21.254	11.58	223.4	13.3	34.87	197.86

### 3.2 双高斯照相物镜

第二个实例是双高斯照相物镜, 其光学特性为视场角  $2\omega = 46^\circ$ ,  $D/f' = 1/3$ ,  $f' = 100$ , 原始参数与系统图见表 3 和图 4.

Table 3

radius	thickness	glass	radius	thickness	glass
42	9			14.4	
100	0.2	F5	-21.5	2.4	BaK9
27	9.2	BaK9	470	9.9	
67	2.4		-28	0.2	ZBaF5
18	16.4	ZBaF5	900	9	
stop			-60		

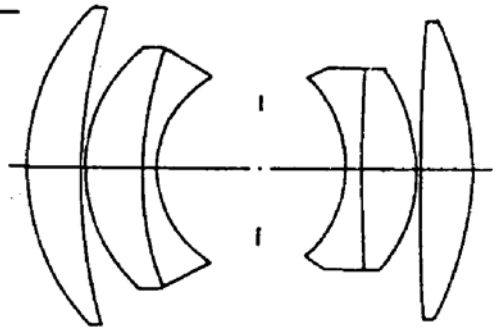

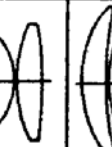
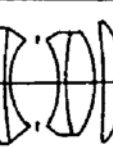
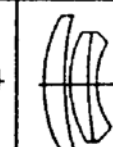
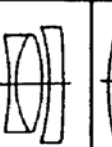


Fig. 4 Double Gauss lens

与双分离单透镜一样, 对原始系统进行抽样并进行像差自动优化后, 得到共 21 个系统, 其中 5 个系统如表 4 所示\*. 英国帝国理工学院光学设计组的 Kidger<sup>[7]</sup>, 在他的博士论文中曾对双高斯物镜作过研究, 找到了双高斯物镜的两个极值点, 一个是表 4 中的图 1, 另一个是表中的图 5. 显然, 除此之外, 还有别的极值点, 用本方法很顺利地找到了这些极值点.

Table 4

system configuration					
iteration	5	6	7	6	13
merit function	110.5	2.5	3.35	0.94	0.84

**结 论** 与 Bohachevsky 的模拟退火和 Sturlesi 的算法相比, 随机抽样全局优化法具有效率高、可靠的特点. 其缺点是编程复杂, 需要较多的光学设计专门知识, 在抽样系统数与保证全局最优之间很难找到统一的判断标准.

\* 在 IBM PC/AT 486 微机作本例需时约六分钟.

## 参 考 文 献

- [1] Nicholas Metropolis, Equation of state calculations by fast computing machines. *J. Chem. Phys.*, 1953, 21(6) : 1087~1092
- [2] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt Jr., M. P. Vecchi, Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 1983, 220 : 671~680
- [3] V. K. Viswanathan, I. O. Bohachevsky, T. P. Cotter, . An attempt to develop an intelligent lens design program. *Proceedings of the 1985 International Lens Design Conference* : 10~17
- [4] Scott W. Weller, annealing: what good is it?. *Proc. SPIE*, 1987, 818 : 265~274
- [5] Gregory K. Hearn, Design optimization using generalized simulated annealing. *Proc. SPIE*, 1987, 818 : 258~264
- [6] Doron Sturlesi, Donald C. O' shea, The search for a global minimum in optical design. *Proc. SPIE*, 1989, 1168 : 92~106
- [7] 袁旭沧, 光学设计, 北京, 科学出版社, 1983 : 670~682
- [8] 方再根, 计算机模拟和蒙特卡洛方法, 北京, 北京工业学院出版社, 1988 : 183~200

## A New Approach to Global Minimum in Optical Design

Li Ling Yuan Shuchang

*(Department of Optical Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100081)**(Received 27 May 1993; revised 11 October 1993)*

**Abstract** An approach to the search for a global minimum in the multidimensional design space of lens design — the method of random sampling is presented in this paper. Comparison with the method of simulated annealing is discussed and two examples, doublet and double Gauss lens, are described.

**Key words** lens design, global minimum, simulated annealing, random sampling.