

文章编号 : 0253-2239(2001)07-0835-06

复杂光学系统的全局优化*

王涌天 程雪岷 刘慧兰 郝 群

(北京理工大学光电工程系,北京 100081)

一色真幸

(日本东京工艺大学光学工程系,日本东京)

摘要: 逃逸函数法是目前最为实用的光学系统全局优化算法之一。这种全局优化的运行由多个不加或加入逃逸函数的阻尼最小二乘法局部优化组成。探讨了提高其优化效率的方法,提出了两个搜索机制以便提高各个局部优化的效率。首先搜索最佳阻尼因子,从而确定多维结构变量空间中解向量的最优方向;再沿该方向搜索解向量的最优长度。此外,用实验方法确定了逃逸函数的控制参数的最佳缺省值。在此基础上成功地研制了实用化的复杂光学系统全局优化程序。

关键词: 复杂光学系统;全局优化;逃逸函数;阻尼最小二乘法;阻尼因子;解向量

中图分类号: TP391 文献标识码: A

1 引 言

目前国际上的主流光学设计和工程软件均采用阻尼最小二乘法作为其基本优化算法,而使用的评价函数的一般形式为

$$\Phi = \sum_i P_i f_i^2, \quad (1)$$

式中 f_i 为实际像差, P_i 为权重, f_i 是光学系统结构变量 x_j ($j = 1, 2, \dots, n$) 的函数,优化的目的是找到评价函数 Φ 在多维结构变量空间的最小值,而阻尼最小二乘法则试图找到一组 x_i 以满足以下条件

$$\partial \Phi / \partial x_j = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n). \quad (2)$$

f_i 的函数形式通常十分复杂且高度非线性,为求解(2)式,把每个 f_i 在起点 x_{j0} 处近似为变量 x_j 的线性函数。这样解出的结果自然也是近似值,但通过多次迭代可望逐渐会聚于准确值。为保证会聚,解向量需在适当的长度内,不超出线性近似范围。为此,在评价函数中加入阻尼量,其一般形式为

$$A = D \sum_j \sigma_j (x_j - x_{j0})^2, \quad (3)$$

其中 σ_j 是由第 j 个变量的类型决定的局部阻尼因子, D 则为整体阻尼系数。

用阻尼最小二乘法优化得到的结构一般不是系

统的最佳设计,而是评价函数在结构变量空间的局部最优解,通常此解与初始结构相近。故此软件求出的最后设计的好坏在很大程度上取决于设计者提供的初始选型,所以设计者的经验仍然起着关键的作用。近年来,设计要求的日趋复杂和有经验的设计师的匮乏迫使人们积极探索高效、实用的全局优化算法。

为解决阻尼最小二乘法的局部极小值问题,东京工艺大学的一色真幸教授^[1]提出了逃逸函数算法。其基本思想是:在优化过程中找到了局部极小值后,首先记录此处的评价函数及相应的结构变量(记为 x_{jL})的值,然后在评价函数中加入逃逸函数,定义如下:

$$B = H \left\{ \exp \left[- \frac{1}{2W^2} \sum_j [\mu_j (x_j - x_{jL})]^2 \right] \right\}^2. \quad (4)$$

此逃逸函数起到了在局部极小点附近填充凹陷的作用,从而改变了原评价函数在结构变量空间中的“地形”。其中 μ_j 是由第 j 个变量的类型确定的权因子,参数 H 与 W 控制逃逸函数的高度及其覆盖范围。用阻尼最小二乘法对加有逃逸函数的新的评价函数进行优化,设计结构将被迫离开被逃逸函数抬高的区域,从而远离已经找到的局部极小。这一步实现后,则从评价函数中去掉逃逸函数,重新开始正常的优化,以寻找其它更好的设计结构。

与以往发表的全局优化算法如模拟退火^[2]和全

* 国家自然科学基金(69778019)和国家教育部跨世纪人才基金资助项目。

局搜索^[3]相比, 逃逸函数算法有两大优点。首先它没有随机抽样操作, 所需的优化时间不会随着变量数目的增多而呈指数性增长; 其次, 使用者定义的各个边界条件限制在优化的整个阶段都在起作用, 有效地防止了优化过程进入结构变量空间的许多无意义的区域(例如元件的中心和边缘厚度为负, 或系统焦距值与设计值偏离过大), 从而实现了在变量空间的定向搜索。因此, 逃逸函数算法在理论上是一种效率很高的全局优化算法。

本文重点探讨如何在实际应用中实现这种高效率。基于逃逸函数的全局优化算法是由多个不加或加入逃逸函数的局部优化组成的, 故此改进阻尼最小二乘法优化算法是提高其效率的一种十分有效的方法。此外, 我们还通过大量实验找出了逃逸函数中的控制参数对逃逸机制的影响规律, 给出了推荐的缺省值。

2 阻尼最小二乘法优化效率的提高

阻尼最小二乘法优化中需要使用像差随结构变

量变化的一阶导数, 这些导数的值是用有限差法计算得到的。实验表明, 导数计算占据了很大一部分优化计算时间, 随着结构变量总数的增加, 所占的比例可能超过 90%。因此, 为了提高阻尼最小二乘算法的效率, 应该设法在每次迭代中充分利用导数计算结果, 使系统得到最大程度的改善。为此我们提出寻找最佳整体阻尼因子和最佳解向量长度。

控制整体阻尼因子的传统方法是: 在每次迭代中建立正规方程组后, 把阻尼因子加入对角线上的各项, 然后解该正规方程组, 求得结构变量的一组变化量 Δx_j , 将其加入结构变量得到新的系统, 并以光线追迹来评价。系统的实际改善由 $\Phi_0 - \Phi_1$ 给出, 其中 Φ_0 和 Φ_1 分别代表迭代前后的评价函数值; 而在线性近似下对系统改善的估计值为

$$\Phi_0 - \Phi_{lin} = \Phi_0 - \sum_i P_i \left(f_{i0} + \sum_j \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \Delta x_j \right)^2 \tag{5}$$

整体阻尼因子的取值则根据两者的比值按表 1 的规律进行调整。

Table 1 Adjustment to global damping factor D

$R = \frac{\Phi_0 - \Phi_1}{\Phi_0 - \Phi_{LIN}}$	adjustment to D	action
$R \leq 0$	$D_1 = 5D_0$	After a failed iteration, changes to the variables are reversed, and the original normal equations are resolved with the new damping factors added down the diagonal terms
$0 < R \leq 0.5$	$D_1 = 2D_0$	Start a new iteration using the new global damping factor
$0.5 < R \leq 0.75$	$D_1 = D_0$	
$0.75 < R \leq 1.25$	$D_1 = 0.5D_0$	
$R > 1.25$	$D_1 = D_0$	

为在每次迭代中使评价函数得到最大幅度的降低, 必须更加仔细地选择整体阻尼因子。Jamieson^[4]曾经提出曲线拟合法, 但在一些特殊情况下, 曲线拟合计算出的阻尼因子有可能导致失败的迭代。为避免不必要的繁琐, 我们提出直接搜索机制。在优化的第一次迭代中, 搜索从固定起始点 $D = 1$ 开始。如果用此整体阻尼因子解出的系统不如初始结构($\Phi_1 \geq \Phi_0$), 就把 D 值乘 10.0 重新求解正规方程组。这样不断反复直到找到某个 D 值使 $\Phi_1 \leq \Phi_0$ 。此后再用因子 2.0 继续调整(减小或增大) D 值并重复解方程组、分析求得的过程, 直到找出对应 Φ_1 最小时的 D 的最佳值。用此最佳值作为当前迭代的最终整体阻尼因子, 以及下一轮迭代中对 D 搜索的起始值。

整体阻尼因子值的变化将导致正规方程组的解向量的大小及方向同时发生变化。图 1 中绘出了仅

有 2 个变量的简单情况下的示意图, 其中用等高线表示评价函数数值在结构变量空间的分布情况。A 点为初始结构的位置, 而在 B 点有一个局部极小值。当整体阻尼因子的值取得很大时, 求得的解向量的方向为沿等高线在 A 点的法线的下降方向, 但其

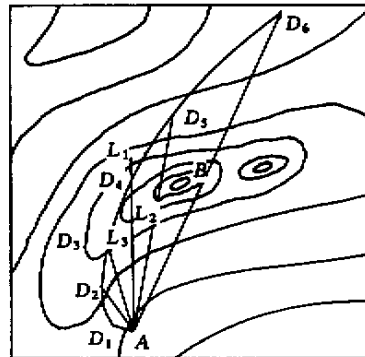


Fig. 1 Searches for optimum global damping factor and solution vector length

长度很小,导致极低的优化效率,如图中 D_1 点所示。相反,过小的整体阻尼因子会使解向量的长度过大而超出线性近似的有效范围,从而将优化进程导向变量空间中更差的区域,如 D_6 点所示。除第一次迭代外,对整体阻尼因子的搜索总是从上一迭代中使用的 D 值开始,故此用于本次迭代的最佳值一般只需几次尝试就可以很快找到。

用上述搜索方法选择的整体阻尼因子确定了解向量在结构变量空间的“最佳”方向。为求系统在每一迭代中获得更大的改善以进一步提高优化效率,我们提出加入第二个搜索机制,沿已确定的方向找寻解向量的最佳长度。图 1 中 \overline{AD}_4 为对应搜索找到的最佳整体阻尼因子的解向量。在这个方向上,以因子 1.3 对解向量的长度进行调整。最佳长度(图中以 L_2 表示)一般只要几次实验就可以得到。

将上述两个搜索机制编程实现后,对不同的光学系统进行了测试验证。比较典型的结果如图 2 所示。被优化的系统是一个检查集成电路掩模版用的 8 片物镜(美国专利号 4,521,085)。当系统中所有光学面的曲率和轴向间距都作为优化变量时,变量总数为 28 个。三条曲线给出了在不同的阻尼最小二乘法优化进程中,评价函数值从初始结构 A 点出发随计算用时的变化情况。在用实线绘制的优化进程中,整体阻尼因子由表 1 给出的常规方法控制,其中几段上升的曲线是由失败的迭代造成的。点线给出的进程中采用了对整体阻尼因子的搜索机制,因此消除了失败的迭代,而且在优化的各个阶段都起到了大大节省计算用时的目的。在评价函数达到一个稳定低点,局部优化结束时,节时约 16.7%。进一步加入第二个搜索最佳解向量长度的机制,可把

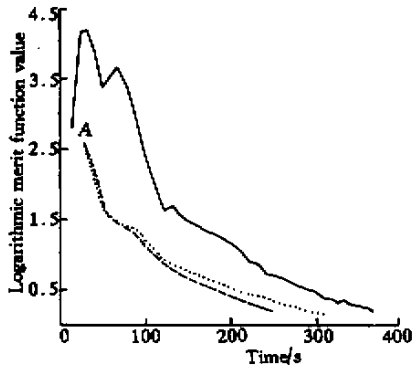


Fig.2 Test results for 8-element IC mask testing objective optimized with 28 variables. — no search
 search for optimum damping factor
 -.-.- employ both search schemes

此节时率提高到 30%,如图中虚线所示。在一般情况下,节时率是随着结构变量总数的增加而提高的。本例中,如允许系统中所有的玻璃材料参数变化,变量总数将增大到 44 个,节时率则相应提高到 35%。在图 2 中,当评价函数达到同一稳定水平时,三种优化进程所需的迭代数分别为 40、29、22。

图 3 是对 6 片反摄远物镜(美国专利号 4,099,850)的优化结果。这组数据不仅进一步确认了我们提出的搜索机制的节时功能,而且体现出在邻域有多个局部极小点的情况下,搜索机制有直接将优化进程导向其中更佳解的能力。

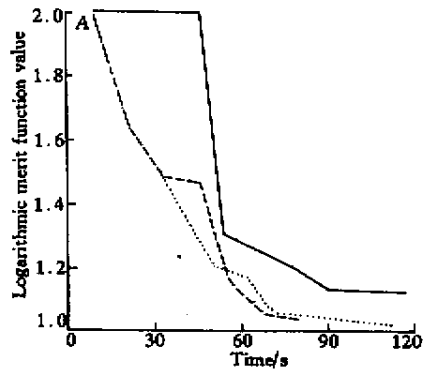


Fig.3 Test results for 6-element inverted telephoto optimized with 36 variables. — no search
 search for optimum damping factor
 -.-.- employ both search schemes

本文提出的搜索机制在应用于有许多变量的复杂系统的优化时效果最明显。但如图 4 所示,在对简单系统(仅有 5 个变量的单色光 2 片镜,该系统在参考文献 2 和 3 中被用来测试不同的全局优化算法)的优化中,采用了对整体阻尼因子及解向量长度的搜索机制的优化进程仍要优于无搜索进程。

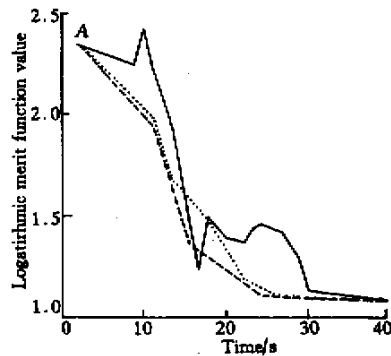


Fig.4 Test results for monochromatic doublet optimized with 5 variables. — no search
 search for optimum damping factor
 -.-.- employ both search schemes

3 逃逸函数控制参数的选取

完成一轮逃逸过程并找到一个新的局部极小点后,需要将其与以前找到的各组解比较,即计算它们在结构变量空间的加权均方根距离

$$d = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n [\mu_j (x_{jL} - x_{jM})]^2}, \quad (6)$$

式中, μ_j 为由结构变量类型确定的权因子, x_{jL} 和 x_{jM} 表示当前解与另一组解的坐标。如果 d 小于预设阈值,则认为两解相同,没有逃逸成功,就必须在此局部加一个更高更宽的逃逸函数重新进行逃逸尝试。由于结构变量空间的地形十分复杂,需要数次尝试才能走出某个局部极小是常有的事。

在(4)式中, H 和 W 分别控制逃逸函数的高度和宽度。设 H_k 和 W_k 为第 k ($k = 1, 2, \dots$) 次逃逸尝试使用的参数,则它们由下式给出^[11]

$$\left. \begin{aligned} H_k &= H_1 H_c^{k-1}, \\ W_k &= [1 + (k-1)W_c] W_1, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

其中 H_1 和 W_1 为初始值, H_c 和 W_c 为增值因子。虽然优化软件一般允许用户修改这些控制参量,但为了方便使用,应提供一组对绝大多数光学系统均适用的缺省值,为此我们做了大量实验。

全局优化功能的主要用途在于设计像质要求较高的光学系统,因此我们的实验也集中针对这类系统。结果表明,控制参数的初始值(H_1, W_1)应该较小,使优化进程得以离开具有狭小地形特征的局部极小,很快地找到距其不远的更佳解,而增值因子(H_c, W_c)则应相对较大,使进程在遇到又深又宽的盆地时,能够在几次尝试后就逃逸成功。当用波像差的均方差作为优化的评价函数时(在对像差较小的系统进行进一步的校正时,这种评价函数的性能大大优于传统的垂轴像差平方和),我们建议采用以下控制参数值

$$\left. \begin{aligned} H_1 &= 0.5, & W_1 &= 0.1, \\ H_c &= 2.0, & W_c &= 2.0. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

图5所示为一个典型的实验实例,绘出了选用不同的逃逸函数控制参数的两个全局优化进程。使用的测试系统是上文中提到的反摄远物镜。可以看到逃逸函数控制参数的选择对优化效率有明显的影响。图中实线画出的优化进程采用了上述推荐缺省值,而在虚线表示的进程中我们把 H_1 的值随意改为 5.0。在相同的优化时间内,前者可以找到更多更好的解。

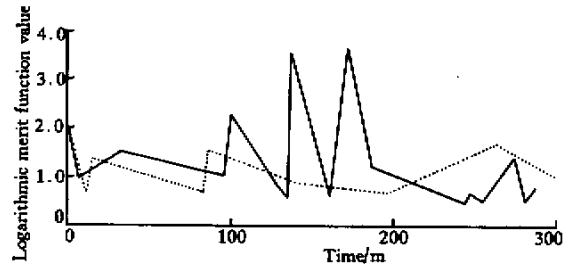


Fig.5 Global optimization runs with different escape function control parameters for 6-element inverted telephoto.
—: $H_1 = 0.5, H_c = 2.0; W_1 = 0.1, W_c = 2.0$;
- - -: $H_1 = 5.0, H_c = 2.0; W_1 = 0.1, W_c = 2.0$

4 逃逸函数算法的程序实现

逃逸函数全局优化算法以及本文探讨的各项提高优化效率的措施已在北京理工大学研制的复杂光学系统设计软件(GOLD)中得到实现。GOLD原名GOSA,是在国家自然科学基金委员会的长期支持下研制的实用化的计算机辅助光学设计大型软件包^[5]。它不但可对传统的对称光学系统进行分析优化,且可处理各种非对称、非常规光学复杂系统。

在GOLD软件中,我们发展了物像空间正则归一化坐标理论^[6],将其应用于非常规复杂光学系统的分析设计^[7],因而在系统的入瞳之间建立了1:1的对应关系,即入瞳上的一个规则网格追迹到出瞳后仍为一规则网格。这个性质使我们得以从少数几条光线的追迹结果计算出瞳波面波像差的均方差,并把它表示成(1)式所示的抽样光线像差的加权平方和的形式^[8]。波像差均方差本身有着明确的物理意义,它与建立在衍射理论基础上的像质指标——像点中心亮度有着直接的联系。因此,用它做为优化评价函数,可加强优化计算的理论依据,从而提高光学系统(特别是高像质要求的系统)的设计质量。

在用GOLD软件对光学系统进行优化设计时,使用者可以根据需要选用上述波像差均方差或传统的几何像差平方和做为评价函数;可以选取复杂光学系统中任何种类的结构参数做为优化变量;可以按要求控制系统的焦距、后工作距、放大率和其它各种高斯光学参量,以及三级像差系统、镜片中心及边缘厚度、系统总长、玻璃变化区域、鬼像及红外扫描成像系统中的冷反射强度等等。程序可以方便地处理多重结构系统、折反射系统、对称系统中经常遇到的关联参数问题,保持它们的同步变化;可以在每一迭代中自动选取最佳像面位置,以便正确地评价当前系统的质量。在选用全局优化时,允许使用者设

置优化最大用时,改变逃逸函数控制参数的缺省值,修改(6)式中计算两组解在结构变量空间的加权均方根距离时所用的不同结构变量类型的权因子,选取区分两组不同解的预设阈值,等等。

5 设计实例

图6画出了使用GOLD软件对上文中的6片反摄远物镜进行全局优化找出的一些较好的结构形式。图中的数值表示相应的评价函数值。优化共使用了36个变量,包括系统中所有的光学面曲率、轴向间距、玻璃材料折射率和色散系数。为了使设计结果与原始专利相符,优化中加入了对系统焦距、最小后截距、最大总长、镜片中心与边缘厚度、玻璃变化区域、轴外视场畸变的控制。程序在主频为233 MHz的Pentium II微机上运行。把专利数据作为初始结构,最初局部优化的评价函数值为9.04。

用逃逸函数算法找到一些比原专利更好的解,其中最好的两个设计分别是在优化开始后245分钟和135分钟得到的。

图7所示的设计实例为一个工作在可见光波段的扫描物镜。优化时采用的初始结构为等厚度的K₉平板玻璃,只把最外边的一对设为平凸透镜以满足系统的焦距要求。系统中所有的结构参量都作为优化变量,但根据系统1:1的工作特性并为加工方便,用GOLD软件中的关联参数将其结构控制为相对光阑对称的形状。用软件中提供的一般边界条件控制镜片中心与边缘厚度,并把材料参数限制在常用玻璃区域内,用特殊边界条件固定系统总长和放大倍率。图中左上角所示结构和数字为用阻尼最小二乘法进行局部优化得到的结构和评价函数值;采用全局优化后,程序在数小时内自动陆续找到图中所示一系列更好的优化结果。

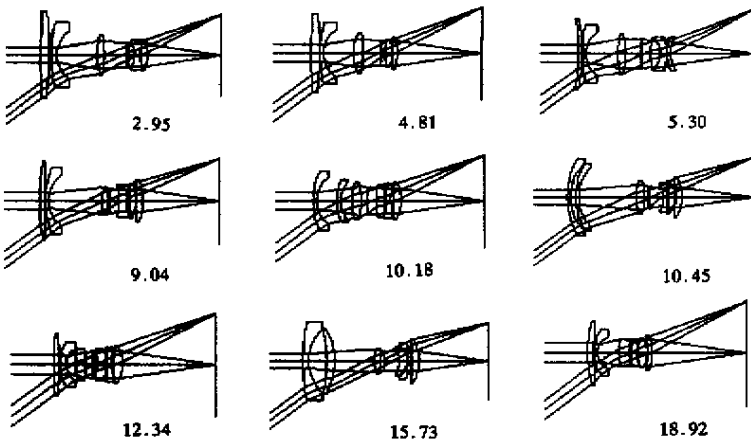


Fig.6 Global optimization run results for 6-element inverted telephoto(with numbers indicating corresponding merit function values)

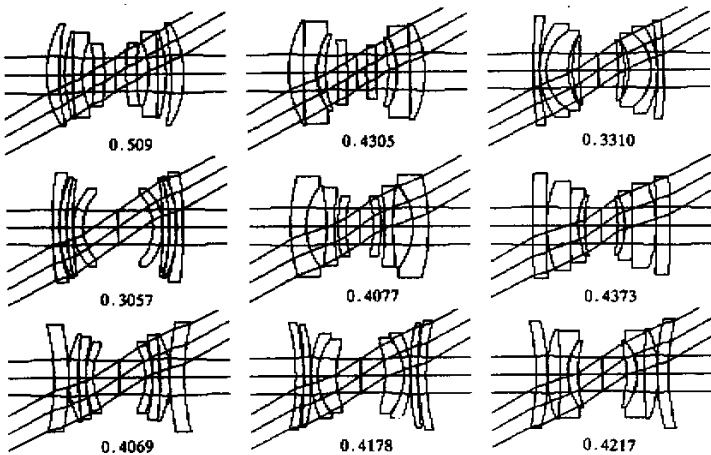


Fig.7 Global optimization run results for 1:1 scanning lens(with numbers indicating corresponding merit function values)

结论 将逃逸函数全局优化算法成功地应用于 GOLD 软件, 并已达到实用化。这种全局优化的效率取决于局部阻尼最小二乘法优化的效率以及逃逸函数控制参数的正确选取。采用对整体阻尼因子和解向量长度的两种搜索机制可以加速最小二乘法优化的会聚, 从而提高全局优化的性能。针对波像差均方差评价函数给出了对绝大多数系统均适用的逃逸函数控制参数缺省值。下一步的工作应利用基因算法或其它机制实现在优化过程中对光学面(元件)的自动增减, 从而真正实现光学系统的智能化设计。

参 考 文 献

- [1] Isshiki M , Ono H , Hiraga K *et al.* . Lens design : Global optimization with escape function. *Opt. Rev.* , 1995 , 2 (6) 463 ~ 470
 [2] Weller S W . Simulated annealing ; what good is it ? *Proc.*

- SPIE* , 1987 , 818 265 ~ 274
 [3] Sturlesi D , O'Shea D C . The search for a global minimum in optical design. *Proc. of Current Developments in Optical Engineering and Commercial Optics. Proc. SPIE* , 1989 , 1168 92 ~ 106
 [4] Jamieson T H . *Optimization Techniques in Lens Design* . London : Adam Hilger , 1971 .
 [5] 王涌天 , 何 定 , 张思炯 . GOLD——新一代复杂光学系统分析优化软件包. *光电工程* , 1997 , 24 (3) 42 ~ 48
 [6] Hopkins H H . Canonical and real-space coordinates used in the theory of image formation. *Applied Optics and Optical Engineering* . 9 , New York : Academic Press , 1983 . 307 ~ 369
 [7] Wang Y , Hopkins H H . Ray-tracing and aberration formulae for a general optical system. *J. Mod. Opt.* , 1992 , 39 (9) : 1897 ~ 1938
 [8] King W B . A direct approach to the evaluation of the variance of the wave aberration. *Appl. Opt.* , 1968 , 7 (3) 489 ~ 494

Global Optimization for Complex Optical Systems

Wang Yongtian Cheng Xuemin Liu Huilan Hao Qun

(*Department of Opto-Electronic Engineering , Beijing Institute of Technology , Beijing 100081*)

Masaki Isshiki

(*Department of Photo-Optical Engineering , Tokyo Institute of Polytechnics , Japan*)

(Received 3 February 2000 ; revised 25 May 2000)

Abstract : The escape function algorithm is one of the most practical global optimization algorithm for optical design published so far. This type of global optimization consists of many local optimization runs with or without the escape function using the damped-least-squares method. To make the algorithm more efficient and powerful , two search schemes are proposed to improve the efficiency of the local optimization runs. The first one searches for the best damping factor which effectively determines the optimum direction of the solution vector in the multi-dimensional variable space , and the second search is conducted along that direction to find the optimum length of the solution vector. Experiments are also made to determine the optimum default values for the control parameters of the escape function. The algorithm is successfully implemented in the GOLD program , which becomes an optical software package with a practical global optimization feature for the design of complex optical systems.

Key words : complex optical systems ; global optimization ; escape function ; damped-least-squares ; damping factor ; solution vector