

# 光学优化设计方法的对比研究

李良钰\* 王仕璠 刘盛纲\*\*

(电子科技大学应用物理系, 高能电子所 成都 610054)

**【摘要】** 介绍了变尺度法和适应法, 并把这两种优化算法借助 C 语言开发的程序用于光学优化设计中, 设计了两种典型的光学系统。对设计过程、设计的结果, 在收敛速度、稳定性和设计的方便性等方面, 作了全面对比分析, 从中得出, 变尺度法是一种更好的优化算法。

**关键词** 变尺度法; 适应法; 光学设计; 优化算法; 对比研究

中图分类号 O439

适应法很早就用于光学优化设计中, 是一种成熟的设计方法。但在用适应法设计光学系统时, 由于各种像差相互关联, 在设计中必须受到人工干预才得以完成<sup>[1]</sup>, 这使光学设计很难在智能化方面得以很好发展。由于光学系统结构复杂, 很难直接求取评价函数, 且状态空间线性程度有限, 变量个数较多, 这就要求优化算法应具有很好的稳定性和快速收敛性。人们一直在寻求一种优化算法, 以便满足光学系统设计的这种需要。本文就变尺度法和适应法进行了全面的对比, 并用各种数据说明, 变尺度法是一种更好的优化算法。

## 1 两种优化算法简介

### 1.1 适应法

适应法是求多元函数有约束极小值的一种方法<sup>[1]</sup>, 但它不是先构造评价函数, 然后使用极小化方法, 而是应用设计者的经验, 逐步对像差进行控制, 在程序中加入一灵活的控制以减少计算量, 提高收敛速度。这种成功的优化方法, 有成功的设计例子, 本文引入这种算法, 是为了和变尺度法进行对比, 适应法的基本运算步骤如图 1a 所示。

### 1.2 变尺度法<sup>[2,3]</sup>

牛顿法的收敛速度快<sup>[3]</sup>, 但它的一个致命弱点是, 每次迭代都要算目标函数的 Hesse 矩阵及其逆矩阵, 所需计算量很大。为了保持牛顿法收敛速度快的特点, 而又不直接计算 Hesse 矩阵, 只是利用迭代过程中的某些已知信息去构造一个新的矩阵, 使得这个新的矩阵与 Hesse 矩阵近似, 这就是变尺度法的思想。

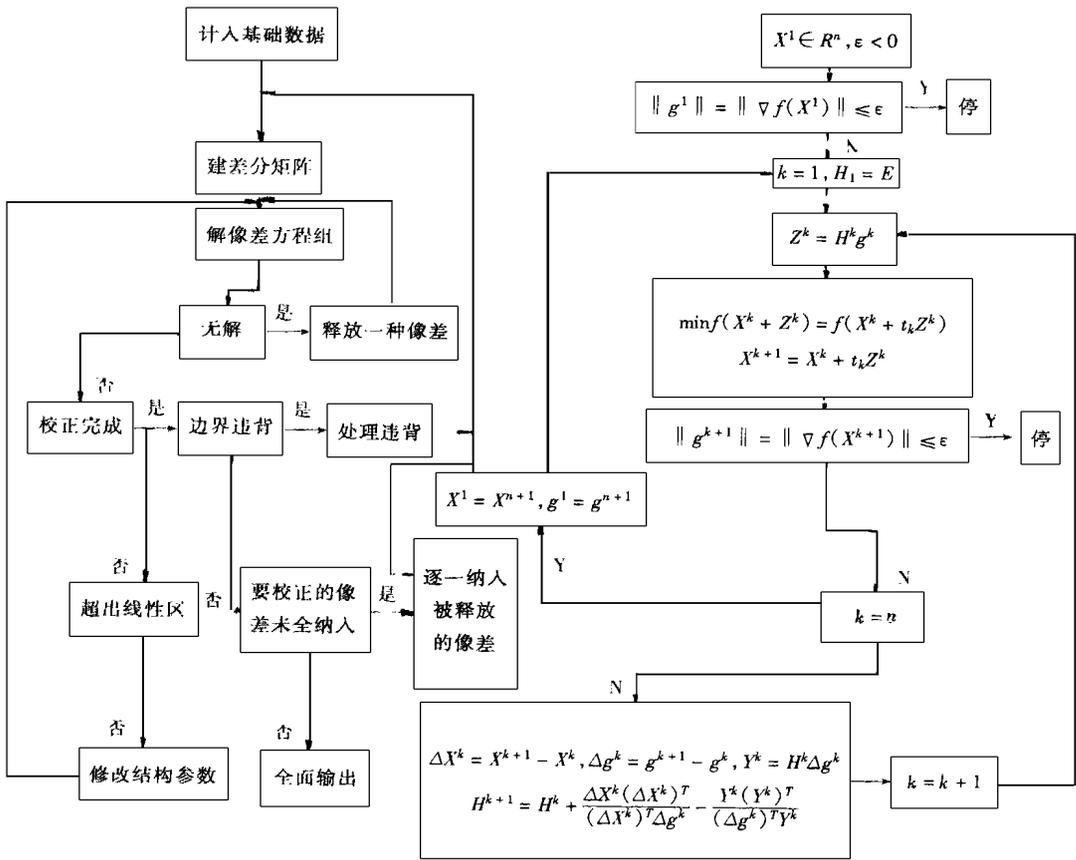
这里所用的变尺度法, 是无约束最优化方法中最有效的算法之一, 它的具体运算步骤如图 1b 所示。

本文就适应法和变尺度法借助于 C 语言开发的程序对两种典型的光学系统, 即双胶合望远镜和双高斯摄影物镜进行了优化设计, 给出了优化后的结果, 并就两种方法的设计过程和设计结果进行了对比分析。

1997 年 8 月 25 日收稿

\* 男 31 岁 博士生 讲师

\*\* 男 64 岁 教授 博士生导师 校长 中国科学院院士



$f(X)$ : 目标函数,  $E$ : 单位矩阵,  $t_k$ : 步长因子,  $\epsilon$ : 精度

(a) 适应法流程

(b) 变尺度法流程

图 1 适应法及变尺度法流程

## 2 设计实例

### 2.1 双胶合望远物镜的设计<sup>[1,4]</sup>

仪器外形尺寸计算对物镜提出的光学特性要求是, 通光孔径  $D=40$  mm, 视场  $2W=6^\circ$ , 入瞳位置与物镜重合  $L_z=0$ ; 物镜后面有一棱镜系统, 展开成玻璃板后的总厚度为 160 mm, 棱镜材料为 K9, 假定不考虑物镜与目镜的像差补偿, 只和棱镜一起校正像差, 整个系统如图 2a 所示。

对于望远镜, 它的视场较小, 像差的校正偏重于轴上点的像差, 即球差、正弦差和色差, 只有长焦距的物镜中才需要考虑二级光谱的校正问题。

这里把球差、彗差、色差作为受控像差进行优化, 两种方法的优化结果及原始结构如表 1 和表 2 所示。表 1 中,  $r_0, r_1, r_2$  分别为原始结构、适应法优化后结构和变尺度法优化后结构的透镜曲率半径;  $d$  为表面间间距;  $n$  为折射率;  $G, B, R$  分别表示绿光、蓝光和红光。表 2 中,  $h$  为系统的孔径半径;  $\hat{q}$  为球差;  $\hat{q}_B$  为蓝光线的像方截距;  $\hat{q}_R$  为红光线的像方截距;  $\Delta L_{BR}$  为位置色差;  $\Delta Y_{BR}$  为垂轴色差。

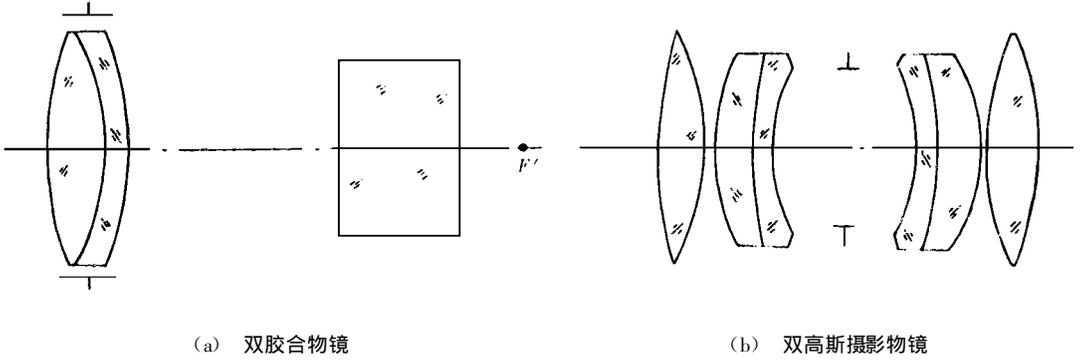


图 2 双胶合望远镜及双高斯摄影物镜结构

表 1 原始结构及两种方法优化后的结构

| $r_0 / \text{mm}$ | $r_1 / \text{mm}$ | $r_2 / \text{mm}$ | $d / \text{mm}$ | $n_G$    | $n_B$    | $n_R$    |
|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|----------|----------|----------|
|                   |                   |                   |                 | 1.000 00 | 1.000 00 | 1.000 00 |
| 150.00            | 196.34            | 231.27            |                 |          |          |          |
|                   |                   |                   | 5.0             | 1.516 30 | 1.521 95 | 1.513 89 |
| -150.00           | -116.95           | -134.71           |                 |          |          |          |
|                   |                   |                   | 3.0             | 1.624 2  | 1.636 63 | 1.619 25 |
| -555.00           | -380.96           | -500.59           |                 |          |          |          |
|                   |                   |                   |                 | 1.000 00 | 1.000 00 | 1.000 00 |

表 2 双胶合物镜原始结构像差及两种方法优化结果的像差

|      | $h / h_{\text{max}}$ | $\delta_L$ | $\delta_{LB}$ | $\delta_{LR}$ | $\Delta L_{BR}$ | $\Delta Y_{BR}$ |
|------|----------------------|------------|---------------|---------------|-----------------|-----------------|
| 原始   | 1.000 00             | 0.233 48   | 1.670 93      | -0.064 00     | 1.734 93        | -6.315 23       |
| 结构   | 0.707 00             | 0.102 53   | 1.471 47      | -0.168 30     | 1.639 77        | -4.464 41       |
| 像差   | 0.300 00             | 0.016 77   | 1.329 55      | -0.234 69     | 1.564 24        | -1.894 21       |
| 适应法  | 1.000 00             | 0.091 22   | 0.276 97      | 0.203 76      | 0.073 21        | -6.266 03       |
| 优化结果 | 0.707 00             | 0.030 49   | 0.158 81      | 0.163 76      | -0.004 94       | -4.429 67       |
| 像差   | 0.300 00             | 0.003 36   | 0.086 42      | 0.152 96      | -0.066 55       | -1.879 49       |
| 变尺度法 | 1.000 00             | 0.394 15   | 0.641 85      | 0.560 82      | 0.080 83        | -0.269 87       |
| 优化结果 | 0.707 00             | 0.184 61   | 0.371 06      | 0.373 16      | -0.002 10       | -0.190 78       |
| 像差   | 0.300 00             | 0.031 47   | 0.169 38      | 0.237 41      | -0.068 03       | -0.080 95       |

原结构的色差(包括位置和垂轴色差)比较大,经适应法优化后,轴上点和轴外点的球差及位置色差都明显减小,彗差变小,只有垂轴色差没变。从望远镜的要求来看,结构变好。经变尺度法优化后,轴上点球差几乎没变,色差(位置和垂轴色差)变小很多,从望远镜的要求来看,结构变好。从收敛速度来看,变尺度法比适应法快得多,适应法和变尺度法都很稳定。

## 2.2 双高斯摄影物镜的设计<sup>[1]</sup>

双高斯摄影物镜是一种中等视场的摄影物镜,它的光学性能指标是:  $D/f' = 1/2$ ,  $W = 40^\circ$ 。它是以厚透镜校正匹兹万场曲的光学系统结构,半部系统由一个弯月型的厚透镜和一个薄透镜组成,如图 2b 所示。

由于双高斯物镜是一个近似对称的系统,设计时只需考虑球差、场曲、像散和色差的校正。特别是场曲,它是妨碍物镜视场的主要像差之一。

把间距和曲率作为变量,分别以球差、像散、场曲和色差作为受控像差,经适应法优化后,轴上点的球差、像散、场曲、色差、色球差和高级球差变小;轴外宽光束像散、场曲和轴外球差几乎没变,结构变好。经变尺度法优化后,轴上点的球差、位置色差、各种情况下的像散和场曲都不同程度变小,垂轴色差比适应法优化的结果还小,色球差也变小一个数量级,只是弧矢高级球差和轴外球差稍变大,其余高级量都不同程度变小,结构变好,设计成功,原始结构及优化结果如表 3 和表 4 所示。表 3 中  $d_0$ 、 $d_1$ 、 $d_2$  分别代表原始结构、适应法和变尺度法优化后结构中透镜表面间间距。表 4 中,  $h$  为系统孔径半径;  $W$  为视场角;  $x_t$  为子午场曲;  $X_s$  为弧矢场曲;  $X_{ts}$  为像散。

表 3 原始结构及两种方法优化后的结构

| $r_0'$ /mm | $r_1'$ /mm | $r_2'$ /mm | $d_0'$ /mm | $d_1'$ /mm | $d_2'$ /mm | $n_G$    | $n_B$    | $n_R$    |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|----------|----------|
|            |            |            |            |            |            | 1.000 00 | 1.000 00 | 1.000 00 |
| 29.540 0   | 28.458 7   | 28.530 0   |            |            |            |          |          |          |
|            |            |            | 5.500 0    | 5.500 0    | 5.500 0    | 1.638 40 | 1.652 89 | 1.635 06 |
| -83.260 0  | -92.681 0  | -80.001 1  |            |            |            |          |          |          |
|            |            |            | 0.100 0    | 0.100 0    | 0.100 0    | 1.000 00 | 1.000 00 | 1.000 00 |
| 17.200 0   | 16.424 2   | 16.154 7   |            |            |            |          |          |          |
|            |            |            | 7.500 0    | 6.648 1    | 6.648 1    | 1.613 00 | 1.625 60 | 1.610 00 |
| 555.000 0  | 76.903 1   | 70.175 2   |            |            |            |          |          |          |
|            |            |            | 2.000 0    | 2.000 0    | 2.000 0    | 1.624 20 | 1.646 77 | 1.619 25 |
| 14.430 0   | 10.786 4   | 10.677 6   |            |            |            |          |          |          |
|            |            |            | 15.600 0   | 13.882 0   | 13.832 2   | 1.000 00 | 1.000 00 | 1.000 00 |
| -14.000 0  | -13.735 9  | -13.895 5  |            |            |            |          |          |          |
|            |            |            | 2.000 0    | 2.000 0    | 2.000 0    | 1.624 20 | 1.646 77 | 1.619 25 |
| -555.000 0 | -841.480 6 | -450.990 7 |            |            |            |          |          |          |
|            |            |            | 7.500 0    | 6.100 0    | 6.104 2    | 1.613 00 | 1.625 60 | 1.610 0  |
| -18.900 0  | -18.872 2  | -19.245 2  |            |            |            |          |          |          |
|            |            |            | 0.100 0    | 0.100 0    | 0.100 0    | 1.000 00 | 1.000 00 | 1.000 00 |
| 70.260 0   | 51.472 5   | 48.235 8   |            |            |            |          |          |          |
|            |            |            | 7.200 0    | 7.200 0    | 7.200 0    | 1.638 40 | 1.652 89 | 1.635 06 |
| -52.000 0  | -53.036 3  | -55.546 9  |            |            |            |          |          |          |
|            |            |            |            |            |            | 1.000 00 | 1.000 00 | 1.000 00 |

表4 双高斯摄影物镜原始结构像差及两种方法优化后的像差

|           | $h/h_{\max}$ | $\bar{\delta}_L$ | $\bar{\delta}_{BR}$ | $W/W_{\max}$ | $X_t$     | $X_s$     | $X_{1s}$  |
|-----------|--------------|------------------|---------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|
| 原始        | 1.000        | -0.868 06        | 0.312 46            | 1.000        | 1.333 78  | 0.465 80  | 0.867 98  |
| 结构<br>像差  | 0.707        | -0.476 66        | 0.210 08            | 0.707        | 0.893 55  | 0.206 89  | 0.686 67  |
|           | 0.300        | -0.090 52        | 0.148 61            | 0.300        | 0.177 69  | 0.031 07  | 0.146 62  |
| 适应法       | 1.000        | 0.005 84         | 0.0334 6            | 1.000        | -0.579 55 | -0.209 82 | -0.369 73 |
| 优化后<br>像差 | 0.707        | -0.091 65        | 0.000 50            | 0.707        | -0.003 66 | -0.142 79 | 0.058 48  |
|           | 0.300        | -0.027 13        | -0.022 28           | 0.300        | -0.006 37 | -0.032 69 | 0.039 06  |
| 变尺度法      | 1.000        | 0.133 52         | 0.095 289           | 1.000        | -0.474 05 | -0.042 00 | -0.432 05 |
| 优化后<br>像差 | 0.707        | -0.044 58        | 0.051 287           | 0.707        | 0.038 98  | -0.060 64 | 0.099 618 |
|           | 0.300        | -0.020 47        | 0.023 157           | 0.300        | 0.034 541 | -0.018 54 | 0.053 076 |

通过这两种方法对摄影物镜的设计,从收敛速度来看,变尺度法快于适应法,适应法要繁琐得多。两种方法都稳定地收敛于结果,只是对设计者来说,适应法要求更高些,搞不好,程序就进入病态。

### 3 两种方法对比

通过对两种方法不同光学系统的优化设计,可以看到:

1) 从收敛速度来看,变尺度法明显快于适应法,这和理论分析一致。

2) 稳定性方面,在受控像差选择得比较合理的情况下,都能够稳定地达到设计要求。但变尺度法在自动摆脱病态方面要强些,并且受控变量的选择没有适应法严格。

3) 在像差与变量个数方面,适应法不允许受控像差多于所用自变量个数,因而要求设计者合理挑选受控对像并安排恰当的校正次序,指定相宜的目标值及公差,并且只能把极少量重要的边界条件纳入像差项进行控制。因而要求设计者有一定的设计经验和像差理论知识。变尺度法在这方面并无苛求,可把较多的像差和边界条件同时纳入控制。

通过设计结果和对比说明,变尺度法是一种更好的优化算法。

### 参 考 文 献

- 1 王永仲. 光学设计与微型计算机. 长沙:国防科技大学出版社, 1986
- 2 南京大学计算数学专业编. 光学自动设计中的数值方法. 北京:国防工业出版社, 1976
- 3 陈开周. 最优化计算方法. 西安:西北电讯工程学院出版社, 1985
- 4 袁旭仓, 李仕贤. 光学设计. 北京:北京理工大学出版社, 1988

# Contrast Study of Optical Optimization

Li Liangyu    Wang Shifan    Liu Shenggang

(Department of Applied Physics, Inst. of High Energy Electronics, UEST of China, Chengdu 610054)

**Abstract** Adaptive method and variable scale method are introduced in this paper. Two sorts of optimal method are applied to optical system design by means of program developed of C Language. Two sorts of typical optical system are designed. Based on the overall analysis and contrast of the speed, stability, convenience of design etc, the result and the process demonstrate that the variable scale method is a better optimal algorithm in optical design.

**Key words** variable scale method; adaptive method; optical design; optimal algorithm; contrast study

编辑 徐培红

.....

°科研成果介绍°

## 光纤宽带区域网原理模型

主研人员 李乐民 胡 钢 谭真平 唐绍淑 胡 波 刘 朴 胡家骏 龚焕星

光纤宽带区域网具有一个节点传输速率为 155.520 Mbps 的试验网原理模型。该成果跟踪了国际通信领域的先进技术,参照了相关的新的国际标准,网络拓扑和媒质访问控制协议采用分布式排队双总线,多路业务复接采用步转移模式,物理层采用基于同步数字系列式排队双总线协议(DQDB)、ATM 层、计算机直接入网的适配、以太网适配,边续流业务适配等关键技术。该试验网可以接入以太网网桥,连续数据流以及计算机图像、数据等各种业务,具有传输综合业务的网络功能。

°科 卞°